

#2 Priority
paper
5-1-01
R. Stokes

PATENT
IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re application of: Masayuki HATA

Serial No.: Not Yet Assigned

Filed: December 26, 2000

For: LIGHT EMITTING DEVICE

jc914 U.S. PTO
09/745998
12/26/00

CLAIM FOR PRIORITY UNDER 35 U.S.C. 119

Director of Patents and Trademarks
Washington, D.C. 20231

December 26, 2000

Sir:

The benefit of the filing date of the following prior foreign application is hereby requested for the above-identified application, and the priority provided in 35 U.S.C. 119 is hereby claimed:


Japanese Appln. No. 11-371745, filed December 27, 1999

In support of this claim, the requisite certified copy of said original foreign application is filed herewith.

It is requested that the file of this application be marked to indicate that the applicants have complied with the requirements of 35 U.S.C. 119 and that the Patent and Trademark Office kindly acknowledge receipt of said certified copy.

In the event that any fees are due in connection with this paper, please charge our Deposit Account No. 01-2340.

Respectfully submitted,
ARMSTRONG, WESTERMAN, HATTORI
McLELAND & NAUGHTON


Le-Nhung McLeland
Reg. No. 31,541

Atty. Docket No.: 001699
Suite 1000, 1725 K Street, N.W.
Washington, D.C. 20006
Tel: (202) 659-2930
Fax: (202) 887-0357
LNM/lrj

日 本 国 特 許 庁
PATENT OFFICE
JAPANESE GOVERNMENT

JC914 U.S. PTO
09/745998
12/26/00

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日

Date of Application:

1 9 9 9 年 1 2 月 2 7 日

出 願 番 号

Application Number:

平成 1 1 年 特 許 願 第 3 7 1 7 4 5 号

出 願 人

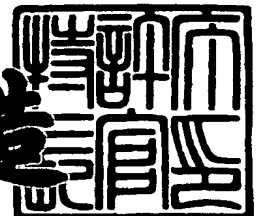
Applicant (s):

三洋電機株式会社

2 0 0 0 年 1 2 月 1 日

特 許 庁 長 官
Commissioner,
Patent Office

及 川 耕 造



出 証 番 号 出 証 特 2 0 0 0 - 3 1 0 0 0 9 6

【書類名】 特許願

【整理番号】 NBA0991058

【提出日】 平成11年12月27日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 H01S 3/025

【発明者】

 【住所又は居所】 大阪府守口市京阪本通 2 丁目 5 番 5 号 三洋電機株式会
社内

 【氏名】 畑 雅幸

【特許出願人】

 【識別番号】 000001889

 【氏名又は名称】 三洋電機株式会社

【代理人】

 【識別番号】 100098305

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 福島 祥人

 【電話番号】 06-6330-5625

【手数料の表示】

 【予納台帳番号】 032920

 【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

 【物件名】 明細書 1

 【物件名】 図面 1

 【物件名】 要約書 1

 【包括委任状番号】 9403774

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 発光素子

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 圧電効果の発生を伴う歪を有する発光層が第 1 の n 型層と第 1 の p 型層とに挟まれるように配置された発光素子であって、

前記圧電効果の結果として発生する前記発光層の電位勾配は前記第 1 の n 型層側が前記第 1 の p 型層側に比べて高く、

少なくとも前記発光層と前記第 1 の p 型層との間に前記発光層よりも大きい禁制帯幅を有する第 2 の n 型層が設けられたことを特徴とする発光素子。

【請求項 2】 前記第 1 の p 型層は第 1 のクラッド層を含み、前記第 2 の n 型層の禁制帯幅が前記第 1 のクラッド層よりも小さいことを特徴とする請求項 1 記載の発光素子。

【請求項 3】 圧電効果の発生を伴う歪を有する発光層が第 1 の n 型層と第 1 の p 型層とに挟まれるように配置された発光素子であって、

前記圧電効果の結果として発生する前記発光層の電位勾配は前記第 1 の n 型層側が前記第 1 の p 型層側に比べて高く、

少なくとも発光層と前記第 1 の n 型層との間に前記発光層よりも大きい禁制帯幅を有する第 2 の p 型層が設けられたことを特徴とする発光素子。

【請求項 4】 前記第 1 の n 型層は第 2 のクラッド層を含み、前記第 2 の p 型層の禁制帯幅が前記第 2 のクラッド層よりも小さいことを特徴とする請求項 3 記載の発光素子。

【請求項 5】 前記発光層を構成する材料の構造はウルツ鉱構造であることを特徴とする請求項 1～4 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 6】 前記発光層の主面はほぼ $\langle 0001 \rangle$ 方向であることを特徴とする請求項 5 記載の発光素子。

【請求項 7】 前記発光層を構成する材料の構造は閃亜鉛鉱構造であることを特徴とする請求項 1～4 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 8】 前記発光層の主面はほぼ $\langle 111 \rangle$ 方向であることを特徴とする請求項 7 記載の発光素子。

【請求項 9】 前記圧電効果の発生を伴う歪は、前記発光層の面内方向に前記発光層を圧縮する歪を含むことを特徴とする請求項 1～8 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 10】 前記圧電効果の発生を伴う歪は、前記発光層の面内方向に前記発光層を伸張する歪を含むことを特徴とする請求項 1～8 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 11】 前記発光層を構成する材料は III－V 族化合物半導体であることを特徴とする請求項 1～10 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 12】 前記 III－V 族化合物半導体は、ホウ素、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも 1 つを含む窒化物系半導体であることを特徴とする請求項 11 記載の発光素子。

【請求項 13】 前記発光層を構成する材料は II－VI 族化合物半導体または I－VII 族化合物半導体であることを特徴とする請求項 1～10 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 14】 前記発光層は、圧電効果の発生を伴う歪を有する 1 つ以上の井戸層と、前記井戸層を挟むように配置された 2 つ以上の障壁層とから構成される量子井戸構造を有し、前記圧電効果の結果として発生する前記井戸層内の電位勾配は、前記第 1 の n 型層側が前記第 1 の p 型層側に比べて高いことを特徴とする請求項 1～13 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 15】 前記量子井戸構造の発光層中にアクセプタ準位およびドナー準位のうち少なくとも一方の準位が前記量子井戸構造の閉じ込め方向に圧電効果の結果として発生する電位勾配を低減するように不均一に形成されたことを特徴とする請求項 14 記載の発光素子。

【請求項 16】 前記井戸層内において、圧電効果の結果として発生する電位の高い前記第 1 の n 型層側に電位の低い前記第 1 の p 型層側に比べてアクセプタ準位が多く形成されたことを特徴とする請求項 15 記載の発光素子。

【請求項 17】 前記井戸層内において、圧電効果の結果として発生する電位の低い前記第 1 の p 型層側に電位の高い前記第 1 の n 型層側に比べてドナー準位が多く形成されたことを特徴とする請求項 15 または 16 記載の発光素子。

【請求項 1 8】 前記障壁層内において、圧電効果の結果として発生する電位の高い前記第 1 の n 型層側の前記井戸層の界面と接する部分に電位の低い前記第 1 の p 型層側の前記井戸層の界面と接する部分に比べてアクセプタ準位が多く形成されたことを特徴とする請求項 1 5 ~ 1 7 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 1 9】 前記障壁層内において、圧電効果の結果として発生する電位の低い前記第 1 の p 型層側の前記井戸層の界面と接する部分に電位の高い前記第 1 の n 型層側の前記井戸層の界面と接する部分に比べてドナー準位が多く形成されたことを特徴とする請求項 1 5 ~ 1 8 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 2 0】 前記量子井戸構造の発光層中にアクセプタ準位およびドナー準位の両方が形成されたことを特徴とする請求項 1 5 ~ 1 9 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 2 1】 前記アクセプタ準位の濃度と前記ドナー準位の濃度とがほぼ等しいことを特徴とする請求項 2 0 記載の発光素子。

【発明の詳細な説明】

【0 0 0 1】

【発明の属する技術分野】

本発明は、圧電効果を有する材料により形成される発光素子に関する。

【0 0 0 2】

【従来の技術】

GaN、GaInN、AlGaN、AlGaInN等のIII 族窒化物半導体（以下、窒化物系半導体と呼ぶ。）を用いた半導体レーザ素子、発光ダイオード等の半導体発光素子は、可視から視外にわたる領域の光を発生する発光素子として応用が期待されている。

【0 0 0 3】

これらの応用の中で、GaInN量子井戸層を発光層とする半導体発光素子の実用化に向けて開発が盛んに行われている。このような半導体発光素子は、サファイア、炭化ケイ素等の基板の（0 0 0 1）面上に、MOVPE法（有機金属気相成長法）やMBE法（分子線エピタキシャル成長法）により作製されている。

【0 0 0 4】

図 4 2 は従来の GaN 系半導体発光素子の構成を示す模式的断面図である。図 4 2 の半導体発光素子は、特開平 6 - 2 6 8 2 5 7 号公報に開示されている。

【0 0 0 5】

図 4 2 において、サファイア基板 6 1 上に、GaN からなるバッファ層 6 2、 n -GaN からなる n -コンタクト層 6 3、多重量子井戸構造を有する発光層 6 4、および p -GaN からなる p -キャップ層 6 5 が順に形成されている。発光層 6 4 は、組成の異なる GaInN からなる複数の障壁層 6 4 a および量子井戸層 6 4 b が交互に積層されてなる。

【0 0 0 6】

このような従来の半導体発光素子の製造方法では、通常、ほぼ (0 0 0 1) 面を主面とするサファイア基板 6 1 を用い、例えば MOVPE 法により、サファイア基板上にバッファ層 6 2 から p -キャップ層 6 5 までの各層を順次形成する。この際、 n -コンタクト層 6 3 から p -キャップ層 6 5 までの各層は、窒化物系半導体の [0 0 0 1] 方向に結晶成長する。

【0 0 0 7】

【発明が解決しようとする課題】

ところで、一般的に閃亜鉛鉱構造、ウルツ鉱構造等の対称中心を持たない結晶では、歪により圧電効果が発生することがある。例えば、閃亜鉛鉱構造では、[1 1 1] 軸に関して圧縮または伸張する歪において圧電効果が最も大きくなる。また、ウルツ鉱構造では、[0 0 0 1] 軸に関して圧縮または伸張する歪において圧電効果が最も大きくなる。

【0 0 0 8】

上記の従来の半導体発光素子において、GaInN からなる発光層 6 4 は、(0 0 0 1) 面を主面とする量子井戸構造を有する。GaInN からなる量子井戸層 6 4 b の格子定数は、 n -GaN からなる n -コンタクト層 6 3 の格子定数よりも大きいので、量子井戸層 6 4 b には量子井戸の面内方向（界面に平行な方向）に圧縮歪が加わり、量子井戸の閉じ込め方向（界面に垂直な方向）には引張り歪が加わる。その結果、圧電効果に伴う電位勾配が量子井戸層 6 4 b 中に発生し、[0 0 0 1] 方向側の電位が低く、[0 0 0 -1] 方向側の電位が高くなる。こ

の場合の量子井戸構造の発光層 6 4 のエネルギーバンドを図 4 3 に示す。なお、図 4 3 には、5 層の障壁層 6 4 a および 4 層の量子井戸層 6 4 b が示される。

【0 0 0 9】

図 4 3 に示すように、発光層 6 4 内の量子井戸層 6 4 b に電位勾配が発生するため、図 4 4 に示すように、注入された電流による電子と正孔とが空間的に分離する。その結果、半導体発光素子において、発光効率が低下する。特に、半導体レーザ素子においては、しきい値電流が高くなる。

【0 0 1 0】

発光層 6 4 の量子井戸層 6 4 b に不純物を添加すると、キャリアの移動により電位勾配が減少する効果が現れる。しかし、量子井戸層 6 4 b に p 型不純物および n 型不純物の両方が添加されると、キャリアが補償され、キャリア濃度が低下する。それにより、キャリアの移動により電位勾配が減少する効果が小さくなる。特に、量子井戸層 6 4 b に添加された p 型不純物の濃度と n 型不純物の濃度とがほぼ等しい場合には、キャリアの移動により電位勾配が減少する効果がさらに小さくなる。

【0 0 1 1】

このような現象は、閃亜鉛鉱構造やウルツ鉱構造等の他の III - V 族化合物半導体（例えば Ga In P 系半導体、Ga As 系半導体または In P 系半導体）、II-VI 族半導体、I-VII 族半導体においても発生する。特に、窒化物系半導体では圧電効果が大きいため、圧電効果により発生する電位勾配が大きくなり、発光効率の低下やしきい値電流および動作電流の上昇が顕著に現れる。

【0 0 1 2】

本発明の目的は、発光効率が高く動作電流またはしきい値電流が低い発光素子を提供することである。

【0 0 1 3】

【課題を解決するための手段および発明の効果】

本発明に係る発光素子は、圧電効果の発生を伴う歪を有する発光層が第 1 の n 型層と第 1 の p 型層とに挟まれるように配置された発光素子であって、圧電効果の結果として発生する発光素子の電位勾配は第 1 の n 型層側が第 1 の p 型層側に

比べて高く、少なくとも発光層と第 1 の p 型層との間に発光層よりも大きい禁制帯幅を有する第 2 の n 型層が設けられたものである。

【0014】

本発明に係る発光素子においては、第 2 の n 型層が発光層と第 1 の p 型層との間に形成されたことにより、発光層の界面に垂直な方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したドナー準位とが空間的に分離され、界面に垂直な方向に圧電効果のために発生する電位勾配が低減される。それにより、電流として注入される電子と正孔との分離が抑制されるので、利得が得られやすくなり、発光効率の低下および動作電流またはしきい値電流の上昇が抑制される。

【0015】

また、第 1 の p 型層は第 1 のクラッド層を含み、第 2 の n 型層の禁制帯幅が第 1 のクラッド層よりも小さくてもよい。この場合、第 2 の n 型層の屈折率が第 1 のクラッド層よりも大きくなるため、第 2 の n 型層が光ガイド層としての機能を有する。

【0016】

本発明に係る発光素子は、圧電効果の発生を伴う歪を有する発光層が第 1 の n 型層と第 1 の p 型層とに挟まれるように配置された発光素子であって、圧電効果の結果として発生する発光層の電位勾配は第 1 の n 型層側が第 1 の p 型層側に比べて高く、少なくとも発光層と第 1 の n 型層との間に発光層よりも大きい禁制帯幅を有する第 2 の p 型層が設けられたものである。

【0017】

本発明に係る発光素子においては、第 2 の p 型層が発光層と第 1 の n 型層との間に形成されることにより、発光層の界面に垂直な方向に正孔の移動が生じ、電子とイオン化したアクセプタ準位とが空間的に分離され、界面に垂直な方向に圧電効果のために発生する電位勾配が低減される。それにより、電流として注入される電子と正孔との分離が抑制されるので、利得が得られやすくなり、発光効率の低下および動作電流またはしきい値電流の上昇が抑制される。

【0018】

また、第 1 の n 型層が第 2 のクラッド層を含み、第 2 の p 型層の禁制帯幅が第

2のクラッド層よりも小さくてもよい。この場合、第2のp型層の屈折率が第2のクラッド層よりも大きくなるため、第2のp型層が光ガイド層としての機能を有する。

【0019】

発光層を構成する材料の構造はウルツ鉱構造であってもよい。ウルツ鉱構造の結晶においては、歪により圧電効果が発生する。したがって、発光層と第1のp型層との間に第2のn型層を設けるか、あるいは発光層と第1のn型層との間に第2のp型層を設けることにより、圧電効果のために発生した発光層の電位勾配が減少する。

【0020】

発光層の主面はほぼ $\langle 0001 \rangle$ 方向であってもよい。ウルツ鉱構造の結晶では $\langle 0001 \rangle$ 軸に関して圧縮または伸張する歪による圧電効果が最も大きくなるので、第2のn型層または第2のp型層を形成することによる電位勾配の減少の効果が顕著に現れる。

【0021】

発光層を構成する材料の構造は閃亜鉛鉱構造であってもよい。閃亜鉛鉱構造の結晶においては、歪により圧電効果が発生する。したがって、発光層と第1のp型層との間に第2のn型層を設けるかまたは発光層と第1のn型層との間に第2のp型層を設けることにより、圧電効果のために発生した発光層の電位勾配が減少する。

【0022】

また、発光層の主面はほぼ $\langle 111 \rangle$ 方向であってもよい。閃亜鉛鉱構造の結晶では、 $\langle 111 \rangle$ 軸方向に関して圧縮または伸張する歪による圧電効果が最も大きくなるので、第2のn型層または第2のp型層を形成することによる電位勾配の減少の効果が顕著に現れる。

【0023】

圧電効果の発生を伴う歪は、発光層の面内方向に発光層を圧縮する歪を含んでもよい。この場合には、発光層の面内方向に発光を圧縮する歪により圧電効果が発生する。したがって、発光層と第1のp型層との間に第2のn型層を形成する

かあるいは発光層と第1のn型層との間に第2のp型層を形成することにより、圧電効果のために発生する電位勾配が低減される。

【0024】

圧電効果の発生を伴う歪は、発光層の面内方向に発光層を伸張する歪を含んでもよい。この場合には、発光層の面内方向に発光層を伸張する歪により圧電効果が発生する。したがって、発光層と第1のp型層との間に第2のn型層を形成するかあるいは発光層と第1のn型層との間に第2のp型層を形成することにより、圧電効果のために発生する電位勾配が低減される。

【0025】

発光層を構成する材料はIII-V族化合物半導体であってもよい。また、III-V族化合物半導体は、ホウ素、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つを含む窒化物系半導体であってもよい。特に、窒化物系半導体では圧電効果が大きいため、圧電効果により発生する電位勾配が大きくなる。したがって、発光層と第1のp型層との間に第2のn型層を形成するかあるいは発光層と第1のn型層との間に第2のp型層を形成することによる電位勾配の減少の効果が顕著に現れる。

【0026】

発光層を構成する材料はII-VI族化合物半導体またはI-VII族化合物半導体であってもよい。この場合にも、発光層と第1のp型層との間に第2のn型層を形成するかあるいは発光層と第1のn型層との間に第2のp型層を形成することにより、圧電効果のために電位勾配を低減することができる。

【0027】

上記の発光素子において、発光層は、圧電効果の発生を伴う歪を有する1つ以上の井戸層と、井戸層を挟むように配置された2つ以上の障壁層とから構成される量子井戸構造を有し、圧電効果の結果として発生する井戸層内の電位勾配は、第1のn型層側が第1のp型層側に比べて高くてもよい。この場合には、発光層と第1のp型層との間に第2のn型層を形成するかあるいは発光層と第1のn型層との間に第2のp型層を形成することにより、量子井戸構造の閉じ込め方向に圧電効果のために発生する電位勾配が低減される。

【0028】

また、量子井戸構造の発光層中にアクセプタ準位およびドナー準位のうち少なくとも一方の準位が量子井戸構造の閉じ込め方向に圧電効果の結果として発生する電位勾配を低減するように不均一に形成されてもよい。

【0029】

この場合、量子井戸構造の発光層中にアクセプタ準位およびドナー準位のうち少なくとも一方の準位が不均一に形成されることにより、量子井戸構造の閉じ込め方向に圧電効果のために発生する電位勾配がさらに低減される。それにより、電流として注入される電子と正孔との分離がさらに抑制されるので、利得が得られやすくなり、発光効率の低下および動作電流またはしきい値電流の上昇がさらに抑制される。

【0030】

発光層は、2つ以上の井戸層と、井戸層を挟む3つ以上の障壁層とにより構成される多重量子井戸構造を有してもよい。また、発光層は、1つの井戸層と、井戸層を挟む2つの障壁層とにより構成される単一量子井戸構造を有してもよい。

【0031】

井戸層内において、圧電効果の結果として発生する電位の高い側に電位の低い側に比べてアクセプタ準位が多く形成されてもよい。

【0032】

この場合、量子井戸構造の閉じ込め方向に正孔の移動が生じ、正孔とイオン化したアクセプタ準位とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した井戸層の電位勾配が減少する。

【0033】

井戸層内において、圧電効果の結果として発生する電位の低い側に電位の高い側に比べてドナー準位が多く形成されてもよい。

【0034】

この場合、量子井戸構造の閉じ込め方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したドナー準位とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した井戸層の電位勾配がさらに減少する。

【0035】

障壁層内において、圧電効果の結果として発生する電位の高い側の井戸層の界面と接する部分に電位の低い側の井戸層の界面と接する部分に比べてアクセプタ準位が多く形成されてもよい。

【0036】

この場合、量子井戸構造の閉じ込め方向に正孔の移動が生じ、正孔とイオン化したアクセプタ準位とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した井戸層の電位勾配がさらに減少する。

【0037】

障壁層内において、圧電効果の結果として発生する電位の低い側の井戸層の界面と接する部分に電位の高い側の井戸層の界面と接する部分に比べてドナー準位が多く形成されてもよい。

【0038】

この場合、量子井戸構造の閉じ込め方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したドナー準位とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した井戸層の電位勾配がさらに減少する。

【0039】

量子井戸層構造の発光層中にアクセプタ準位およびドナー準位の両方が形成されてもよい。この場合、電子と正孔とが補償され、アクセプタ準位およびドナー準位の形成によるキャリアはほとんど発生しないが、イオン化したアクセプタ準位とイオン化したドナー準位とにより圧電効果のために発生した電位勾配が減少する。

【0040】

アクセプタ準位の濃度とドナー準位の濃度とがほぼ等しくてもよい。この場合には、キャリアが補償されやすいが、電位勾配が減少する効果は大きい。

【0041】

【発明の実施の形態】

(A) 第1の実施の形態

第1の実施の形態の発光素子は、(0001)面を主面とするウルツ鉱構造の

発光層を有する。この発光層は、発光層の面に垂直な方向（界面に垂直な方向）に歪を有する。このような発光層中には、圧電効果により電位勾配が形成される。

【0042】

ここで、歪を有する発光層は、単層構造であってもよい。あるいは、1つの量子井戸層が2つの障壁層の間に挟まれた単一量子井戸構造（SQW構造）であってもよく、また2つ以上の井戸層と3つ以上の障壁層とが交互に積層されてなる多重量子井戸構造（MQW構造）であってもよい。SQW構造およびMQW構造のような量子井戸構造を有する発光層においては、井戸層が歪を有しており、井戸層内に圧電効果により電位勾配が形成される。

【0043】

発光層はp型層とn型層とに挟まれるように配置される。p型層にはp電極が形成されており、p電極からp型層に正孔が注入される。n型層にはn電極が形成されており、n電極からn型層に電子が注入される。

【0044】

III-V族化合物半導体において、発光層が面内方向（界面に平行な方向）に圧縮歪を有し、発光層の界面に垂直な方向に伸張する歪を有する場合、圧電効果により発生した発光層中の電位勾配において、 $[000-1]$ 方向側の電位が高く、 $[0001]$ 方向側の電位が低い。このような歪を発光層に有し、 $[0001]$ 方向側にp型層を有し、 $[000-1]$ 方向側にn型層を有している発光素子において、発光層における電位勾配は、n型層側の方がp型層側に比べて高い。なお、発光層が量子井戸構造を有する場合において、量子井戸層内における電位勾配は、n型層側の方がp型層側に比べて高い。圧電効果のために発生した電位勾配を減少させるためには、p型層と発光層との間に、発光層に比べて大きな禁制帯幅を有するn型の逆導電型層を形成する。あるいは、n型層と発光層との間に、発光層に比べて大きな禁制帯幅を有するp型の逆導電型層を形成する。このような方法により、発光層が単層構造を有する場合、および量子井戸構造を有する場合のいずれにおいても、同様の効果が得られる。

【0045】

さらに、発光層が量子井戸構造を有する場合においては、量子井戸層にアクセプタ準位またはドナー準位を不均一に形成することで、圧電効果のために発生した発光層の電位勾配をさらに低減することができる。この場合、アクセプタ準位を量子井戸層中の $[000-1]$ 方向側の部分に多く形成し、または障壁層中で量子井戸層の $[000-1]$ 方向側の界面と接する部分に多く形成する。あるいは、ドナー準位を量子井戸層中の $[0001]$ 方向側の部分に多く形成し、または障壁層中で量子井戸層の $[0001]$ 方向側の界面と接する部分に多く形成する。

【0046】

一方、III - V 族化合物半導体において、発光層が面内方向（界面に平行な方向）に伸張する歪を有し、発光層の界面に垂直な方向に圧縮歪を有する場合、圧電効果により発生した発光層中の電位勾配において、 $[0001]$ 方向側の電位が高く、 $[000-1]$ 方向側の電位が低い。このような歪を発光層に有し、 $[0001]$ 方向側に n 型層を有し、 $[000-1]$ 方向側に p 型層を有している発光素子において、発光層における電位勾配は、n 型層側の方が p 型層側に比べて高い。なお、発光層が量子井戸構造を有する場合において、量子井戸層内における電位勾配は、n 型層側の方が p 型層側に比べて高い。圧電効果のために発生した電位勾配を減少させるためには、p 型層と発光層との間に、発光層に比べて大きな禁制帯幅を有する n 型の逆導電型層を形成する。あるいは、n 型層と発光層との間に、発光層に比べて大きな禁制帯幅を有する p 型の逆導電型層を形成する。このような方法により、発光層が単層構造を有する場合、および量子井戸構造を有する場合のいずれにおいても、同様の効果が得られる。

【0047】

さらに、発光層が量子井戸構造を有する場合においては、量子井戸層にアクセプタ準位またはドナー準位を不均一に形成することで、圧電効果のために発生した発光層の電位勾配をさらに低減することができる。この場合、アクセプタ準位を量子井戸層中の $[0001]$ 方向側の部分に多く形成し、または障壁層中で量子井戸層の $[0001]$ 方向側の界面と接する部分に多く形成する。あるいは、ドナー準位を量子井戸層中の $[000-1]$ 方向側の部分に多く形成し、または障壁層中で量子井戸層の $[000-1]$ 方向側の界面と接する部分に多く形成する。

【 0 0 4 8 】

図 1 は本発明の第 1 ～第 8 の実施例における半導体レーザ素子の構成を示す模式的斜視図である。

【 0 0 4 9 】

図 1 において、サファイア基板 1 の (0 0 0 1) 面上に厚さ 1 5 n m 程度の A l G a N からなるバッファ層 2 が形成されている。このバッファ層 2 上に、厚さ 0 . 5 μ m 程度のアンドープ G a N 層 3、厚さ 4 μ m 程度の n - G a N からなる n - コンタクト層 4、厚さ 0 . 1 μ m 程度の n - G a I n N からなる n - クラック防止層 5、厚さ 0 . 4 5 μ m 程度の n - A l G a N からなる n - クラッド層 6、厚さ 5 0 n m 程度の n - G a N からなる n - クラッド層 7、および厚さ 5 0 n m 程度の G a I n N からなる発光層 8 が順に形成されている。この場合においては、n - クラッド層 7 が光ガイド層としての機能も兼ね備えている。

【 0 0 5 0 】

なお、後述するように、第 1 の実施例の半導体レーザ素子の発光層 8 は、単層構造を有する。また、第 2 ～第 8 の実施例の半導体レーザ素子の発光層 8 は、多重量子井戸構造を有する。

【 0 0 5 1 】

発光層 8 上に、厚さ 4 0 n m 程度の n - G a N からなる n - 逆導電型層 9、厚さ 0 . 4 5 μ m 程度の p - A l G a N からなる p - クラッド層 1 0 および厚さ 5 0 n m 程度の p - G a N からなる p - キャップ層 1 1 が順に形成されている。

【 0 0 5 2 】

p - キャップ層 1 1 上には、厚さ 0 . 2 μ m 程度のシリコン窒化物からなる電流狭窄層 (電流ブロック層) 1 4 が形成されている。電流狭窄層 1 4 は、幅 2 μ m 程度のストライプ状開口部を有し、このストライプ状開口部が電流通路 1 3 となる。

【 0 0 5 3 】

電流狭窄層 1 4 のストライプ状開口部内および p - キャップ層 1 1 上および電流狭窄層 1 4 上には、厚さ 3 ～ 5 μ m の p - G a N からなる p - コンタクト層 1 2 が形成されている。アンドープ G a N 層 3 から p - コンタクト層 1 2 までの各

層はウルツ鉱構造を有し、これらの窒化物系半導体の $[0001]$ 方向に成長している。

【0054】

p-コンタクト層 12 から n-コンタクト層 4 までの一部領域が除去され、n-コンタクト層 4 の表面が露出している。それにより、幅約 $10\mu\text{m}$ のメサ形状が形成されている。p-コンタクト層 12 上に p 電極 15 が形成され、n-コンタクト層 4 の露出した表面上に n 電極 16 が形成されている。

【0055】

上記の半導体レーザ素子は、InGaN からなり (0001) 面を主面とする発光層 8 を有するとともに、発光層 8 の $[0001]$ 方向に p-クラッド層 10 を有し、発光層 8 の $[000-1]$ 方向側に n-クラッド層 7 を有する。この場合、発光層 8 の面内方向（界面に平行な方向）に圧縮歪が発生し、発光層 8 の界面に垂直な方向に伸張する歪が発生する。その結果、発光層 8 内に圧電効果に伴う電位勾配が形成される。この電位勾配において、n-クラッド層 7 が形成された $[000-1]$ 方向側の電位が高く、p-クラッド層 10 が形成された $[0001]$ 側の電位が低い。

【0056】

以下の第 1 ～ 第 8 の実施例では、発光層 8 に形成される電位勾配を低減するために、p-クラッド層 10 と発光層 8 との間に、発光層 8 に比べて大きな禁制帯幅を有する n-GaN からなる n-逆導電型層 9 が形成されている。なお、n-逆導電型層 9 の厚さは $1\sim 100\text{nm}$ 程度であることが好ましく、例えばこの場合においては 40nm 程度である。また、n-逆導電型層 9 のドナー準位の濃度は $1\times 10^{17}\sim 3\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 程度であることが好ましい。さらに、後述のように、n-逆導電型層 9 は、p-クラッド層 10 に比べて屈折率が高いため、光ガイド層としての機能も兼ね備えている。

【0057】

(1) 第 1 の実施例

図 2 および図 3 は第 1 の実施例の半導体レーザ素子における n-クラッド層 7、発光層 8、n-逆導電型層 9 および p-クラッド層 10 のエネルギーバンド図

である。なお、実施例 1 の半導体レーザ素子において、発光層 8 は単層構造を有する。

【0058】

ここで、厚さ $0.5\ \mu\text{m}$ 程度のアンドープ GaN 層 3 および厚さ $4\ \mu\text{m}$ 程度の n-GaN からなる n-コンタクト層 4 の格子定数に比べて、InGa_N からなる発光層 8 の格子定数が大きいので、発光層 8 の面内方向（界面に平行な方向）に圧縮歪が発生し、発光層 8 の界面に垂直な方向に伸張する歪が発生する。

【0059】

図 2 に示すように、発光層 8 には圧電効果に伴う電位勾配が形成されているため、発光層 8 の禁制帯（エネルギーバンド）は勾配を有する。発光層 8 のエネルギーバンドの勾配において、 $[0001]$ 方向側つまり p-クラッド層 10 側が、 $[000-1]$ 方向側つまり n-クラッド層 7 側に比べて高い。

【0060】

発光層 8 の $[0001]$ 方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側に、ドナー準位が形成されるとともに発光層 8 に比べて大きな禁制帯幅（エネルギーバンドギャップ）を有する n-GaN からなる n-逆導電型層 9 が形成されている。この n-逆導電型層 9 の禁制帯幅は、p-AlGa_N からなる p-クラッド層 10 に比べて小さいので、n-逆導電型層 9 の屈折率は p-クラッド層 10 に比べて大きい。したがって、n-逆導電型層 9 は光ガイド層としての機能も有している。

【0061】

本実施例では、図 2 に示すように発光層 8 の $[0001]$ 方向側、すなわちエネルギーバンド勾配の高い側に発光層 8 に比べて大きな禁制帯幅を有する n-逆導電型層 9 が形成されているので、図 3 に示すように $[000-1]$ 方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したドナー準位とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した発光層 8 の電位勾配が減少し、エネルギーバンドの勾配も減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

【0062】

上記の実施例 1 においては、発光層 8 が単層構造を有する場合について説明したが、以下の実施例 2 ～ 8 においては、発光層 8 が多重量子井戸構造 (MQW 構造) を有する場合について説明する。

【0063】

図 4 は MQW 構造を有する発光層 8 (以下、MQW 発光層 8 と呼ぶ) のエネルギーバンド図である。

【0064】

図 4 に示すように MQW 発光層 8 は、厚さ 4 nm 程度の GaN からなる障壁層 8a と厚さ 4 nm 程度の GaInN からなる量子井戸層 8b とが交互に積層されてなる多重量子井戸構造を有する。例えば、GaN からなる障壁層 8a の数は 5 であり、GaInN からなる量子井戸層 8b の数は 4 である。

【0065】

ここで、厚さ 0.5 μ m 程度のアンダーブレイク GaN 層 3 および厚さ 4 μ m 程度の n-GaN からなる n-コンタクト層 4 の格子定数に比べて、GaInN からなる量子井戸層 8b の格子定数が大きいので、量子井戸の面内方向 (界面に平行な方向) に圧縮歪が発生し、量子井戸の閉じ込め方向 (界面に垂直な方向) に伸張する歪が発生する。その結果、MQW 発光層 8 内の量子井戸層 8b に圧電効果に伴う電位勾配が形成され、MQW 発光層 8 内のエネルギーバンドは図 4 に示す構造となる。

【0066】

図 4 に示すように、MQW 発光層 8 のエネルギーバンドの勾配においては、[0001] 方向側つまり p-クラッド層 10 側が、[000-1] 方向側つまり n-クラッド層 7 側に比べて高い。

【0067】

以下の第 2 ～ 第 8 の実施例では、量子井戸層 8b に形成される電位勾配を低減するために、MQW 発光層 8 と p-クラッド層 10 との間に n-GaN からなる n-逆導電型層 9 が形成されるとともに、MQW 発光層 8 中に p 型不純物および n 型不純物の少なくとも一方が不均一に添加される。

【0068】

(2) 第2の実施例

図5および図6は第2の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層8のエネルギーバンド図である。

【0069】

図5に示すように、MQW発光層8の $[0001]$ 方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側に、MQW発光層8に比べて大きな禁制帯幅を有し、ドナー準位が形成されたGa₂Nからなるn-逆導電型層9が形成されている。このn-逆導電型層9の禁制帯幅は、p-AlGa₂Nからなるp-クラッド層10の禁制帯幅に比べて小さいので、n-逆導電型層9の屈折率はp-クラッド層10の屈折率に比べて大きくなる。したがって、n-逆導電型層9は光ガイド層としての機能も有している。

【0070】

なお、MQW発光層に比べて大きな禁制帯幅を有する逆導電型層は、MQWの電子に対する基底状態のエネルギーより逆導電型層の伝導帯のバンド下端のエネルギーが高く、かつMQWの正孔に対する基底状態のエネルギーより、逆導電型層の価電子帯のバンド上端のエネルギーが低い半導体から構成される。

【0071】

さらに、p型不純物として例えばMgが量子井戸層8b中の $[000-1]$ 方向側つまりn-クラッド層7側に多くドーピングされている。具体的には、量子井戸層8b中のn-クラッド層7側の厚さ約2nmの部分にのみMgがドーピングされ、量子井戸層8b中のp-クラッド層9側の厚さ約2nmの部分にMgはドーピングされていない。

【0072】

Mgのドーピング量としては、 $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ が好ましい。p型不純物の不均一なドーピングの方法としては、これ以外の方法を用いてもよい。例えば、量子井戸層8b中のn-クラッド層7側の界面から深さ約1nmの部分に $2 \times 10^{10} \sim 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 程度の濃度にp型不純物をデルタドーピングしてもよい。p型不純物として、Mg以外にBe、Ca、Sr、Ba、Zn、Cd、Hg等を用いてもよい。

【0073】

本実施例では、図5に示すように、量子井戸層8bの[0001]方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側にMQW発光層8に比べて大きな禁制帯幅を有するn-逆導電型層9が形成されているので、図6に示すように、[000-1]方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したドナー準位とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した量子井戸層8bの電位勾配が減少し、エネルギーバンドの勾配も減少する。

【0074】

さらに、本実施例では、図5に示すようにp型不純物として例えばMgが量子井戸層8b中の[000-1]方向側つまりn-クラッド層7側に多くドーピングされているので、図6に示すように[0001]方向に正孔の移動が生じ、正孔とイオン化したp型不純物とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した量子井戸層8bの電位勾配がさらに減少し、エネルギーバンドの勾配もさらに減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離がさらに抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇がさらに抑制される。

【0075】

(3) 第3の実施例

図7および図8は第3の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層8のエネルギーバンド図である。

【0076】

図7に示すように、MQW発光層8の[0001]方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側に、MQW発光層8に比べて大きな禁制帯幅を有し、ドナー準位が形成されたGa_{0.9}N_{0.1}からなるn-逆導電型層9が形成されている。このn-逆導電型層9の禁制帯幅は、p-AlGa_{0.9}N_{0.1}からなるp-クラッド層10の禁制帯幅に比べて小さいので、n-逆導電型層9の屈折率はp-クラッド層10の屈折率に比べて大きくなる。したがって、n-逆導電型層9は光ガイド層としての機能も有している。

【0077】

なお、MQW発光層に比べて大きな禁制帯幅を有する逆導電型層は、MQWの

電子に対する基底状態のエネルギーより逆導電型層の伝導帯のバンド下端のエネルギーが高く、かつMQWの正孔に対する基底状態のエネルギーより、逆導電型層の価電子帯のバンド上端のエネルギーが低い半導体から構成される。

【0078】

さらに、n型不純物として例えばSiが量子井戸層8b中の[0001]方向側つまりp-クラッド層10側に多くドーピングされている。具体的には、量子井戸層8b中のp-クラッド層10側の厚さ約2nmの部分にのみSiがドーピングされ、量子井戸層8b中のn-クラッド層7側の厚さ約2nmの部分にSiはドーピングされていない。

【0079】

Siのドーピング量としては、 $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ が好ましい。n型不純物の不均一なドーピングの方法としては、これ以外の方法を用いてもよい。例えば、量子井戸層8b中のp-クラッド層10側の界面から深さ約1nmの部分に $2 \times 10^{10} \sim 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 程度の濃度にn型不純物をデルタドーピングしてもよい。n型不純物として、Si以外にGe、Pb、S、Se、Te等を用いてもよい。

【0080】

本実施例では、図7に示すように、量子井戸層8bの[0001]方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側にMQW発光層8に比べて大きな禁制帯幅を有するn-逆導電型層9が形成されているので、図8に示すように、[000-1]方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したドナー準位とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した量子井戸層8bの電位勾配が減少し、エネルギーバンドの勾配も減少する。

【0081】

さらに、本実施例では、図7に示すようにn型不純物として例えばSiが量子井戸層8b中の[0001]方向側つまりp-クラッド層10側に多くドーピングされているので、図8に示すように[000-1]方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したn型不純物とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した量子井戸層8bの電位勾配がさらに減少する。その結果、電流として注

入された電子と正孔との分離がさらに抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流のさらに上昇が抑制される。

【0082】

(4) 第4の実施例

図9および図10は第4の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層8のエネルギーバンド図である。

【0083】

図9に示すように、MQW発光層8の[0001]方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側に、MQW発光層8に比べて大きな禁制帯幅を有し、ドナー準位が形成されたGa_{0.9}N_{0.1}からなるn-逆導電型層9が形成されている。このn-逆導電型層9の禁制帯幅は、p-AlGa_{0.9}N_{0.1}からなるp-クラッド層10の禁制帯幅に比べて小さいので、n-逆導電型層9の屈折率はp-クラッド層10の屈折率に比べて大きくなる。したがって、n-逆導電型層9は光ガイド層としての機能も有している。

【0084】

なお、MQW発光層に比べて大きな禁制帯幅を有する逆導電型層は、MQWの電子に対する基底状態のエネルギーより逆導電型層の伝導帯のバンド下端のエネルギーが高く、かつMQWの正孔に対する基底状態のエネルギーより、逆導電型層の価電子帯のバンド上端のエネルギーが低い半導体から構成される。

【0085】

さらに、p型不純物として例えばMgが障壁層8a中で量子井戸層8bの[000-1]方向側つまりn-クラッド層7側の界面と接する部分に多くドーピングされている。具体的には、障壁層8a中で量子井戸層8bのn-クラッド層7側の界面と接する厚さ約2nmの部分にのみMgがドーピングされ、障壁層8a中で量子井戸層8bのp-クラッド層10側の界面と接する厚さ約2nmの部分にMgはドーピングされていない。

【0086】

Mgのドーピング量としては、 $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ が好ましい。p型不純物の不均一なドーピングの方法としては、これ以外の方法を用いてもよい。例

例えば、障壁層 8a 中で量子井戸層 8b の n -クラッド層 7 側の界面から深さ約 1 nm の部分に $2 \times 10^{10} \sim 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 程度の濃度に p 型不純物をデルタドーピングしてもよい。 p 型不純物として、Mg 以外に Be、Ca、Sr、Ba、Zn、Cd、Hg 等を用いてもよい。

【0087】

本実施例では、図 9 に示すように、量子井戸層 8b の $[0001]$ 方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側に MQW 発光層 8 に比べて大きな禁制帯幅を有する n -逆導電型層 9 が形成されているので、図 10 に示すように、 $[000-1]$ 方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したドナー準位とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した量子井戸層 8b の電位勾配が減少し、エネルギーバンドの勾配も減少する。

【0088】

さらに、本実施例では、図 9 に示すように p 型不純物として例えば Mg が障壁層 8a 中で量子井戸層 8b の $[000-1]$ 方向側つまり n -クラッド層 7 側の界面と接する部分に多くドーピングされているので、図 10 に示すように $[0001]$ 方向に正孔の移動が生じ、正孔とイオン化した p 型不純物とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した量子井戸層 8b の電位勾配がさらに減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離がさらに抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇がさらに抑制される。

【0089】

(5) 第 5 の実施例

図 11 および図 12 は第 5 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層 8 のエネルギーバンド図である。

【0090】

図 11 に示すように、MQW 発光層 8 の $[0001]$ 方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側に、MQW 発光層 8 に比べて大きな禁制帯幅を有し、ドナー準位が形成された GaN からなる n -逆導電型層 9 が形成されている。この n -逆導電型層 9 の禁制帯幅は、 p -AlGaIn からなる p -クラッド層 10 の禁制帯幅に比べて小さいので、 n -逆導電型層 9 の屈折率は p -クラッド層 10 の屈

折率に比べて大きくなる。したがって、 n -逆導電型層 9 は光ガイド層としての機能も有している。

【0091】

なお、MQW 発光層に比べて大きな禁制帯幅を有する逆導電型層は、MQW の電子に対する基底状態のエネルギーより逆導電型層の伝導帯のバンド下端のエネルギーが高く、かつ MQW の正孔に対する基底状態のエネルギーより、逆導電型層の価電子帯のバンド上端のエネルギーが低い半導体から構成される。

【0092】

さらに、 n 型不純物として例えば Si が障壁層 8 a 中で量子井戸層 8 b の [001] 方向側つまり p -クラッド層 10 側の界面と接する部分に多くドーブされている。具体的には、障壁層 8 a 中で量子井戸層 8 b の p -クラッド層 10 側の界面と接する厚さ約 2 nm の部分にのみ Si がドーブされ、障壁層 8 a 中で量子井戸層 8 b の n -クラッド層 7 側の界面と接する厚さ約 2 nm の部分に Si はドーブされていない。

【0093】

Si のドーブ量としては、 $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ が好ましい。 n 型不純物の不均一なドーピングの方法としては、これ以外の方法を用いてもよい。例えば、障壁層 8 a 中で量子井戸層 8 b の p -クラッド層 10 側の界面から深さ約 1 nm の部分に $2 \times 10^{10} \sim 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 程度の濃度に n 型不純物をデルタドーピングしてもよい。 n 型不純物として、Si 以外に Ge、Pb、S、Se、Te 等を用いてもよい。

【0094】

本実施例では、図 11 に示すように、量子井戸層 8 b の [001] 方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側に MQW 発光層 8 に比べて大きな禁制帯幅を有する n -逆導電型層 9 が形成されているので、図 12 に示すように、[000-1] 方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したドナー準位とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した量子井戸層 8 b の電位勾配が減少し、エネルギーバンドの勾配も減少する。

【0095】

さらに、本実施例では、図11に示すようにn型不純物として例えばSiが障壁層8a中で量子井戸層8bの[0001]方向側つまりp-クラッド層10側の界面と接する部分に多くドーピングされているので、図12に示すように[000-1]方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したn型不純物とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した量子井戸層8bの電位勾配がさらに減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離がさらに抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇がさらに抑制される。

【0096】

上記第2～第5の実施例におけるドーピング方法は、それぞれ単独で用いても効果が得られるが、2つ以上の実施例のドーピング方法を組み合わせてもよい。例えば、第2および第3の実施例を組み合わせてもよく、第2、第3および第4の実施例を組み合わせてもよく、第2、第3、第4および第5の実施例を組み合わせてもよい。これらの場合について以下に説明する。

【0097】

(6) 第6の実施例

図13および図14は第6の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層8のエネルギーバンド図である。

【0098】

第6の実施例は、図13に示すように、第2の実施例と第3の実施例とを組み合わせたものである。本実施例では、MQW発光層8の[0001]方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側に、MQW発光層8に比べて大きな禁制帯幅を有し、ドナー準位が形成されたGaNからなるn-逆導電型層9が形成されている。

【0099】

さらに、本実施例では、p型不純物であるMgが量子井戸層8b中の[000-1]方向側つまりn-クラッド層7側に多くドーピングされるとともに、n型不純物であるSiが量子井戸層8b中の[0001]方向側つまりp-クラッド層10側に多くドーピングされている。なお、本実施例では、p型不純物であるMgおよびn型不純物であるSiのドーピング濃度がほぼ等しい場合について示している。

【0100】

本実施例では、図13に示すように、量子井戸層8bの[0001]方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側にMQW発光層8に比べて大きな禁制帯幅を有するn-逆導電型層9が形成されているので、図14に示すように、[000-1]方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したドナー準位とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した量子井戸層8bの電位勾配が減少し、エネルギーバンドの勾配も減少する。

【0101】

さらに、本実施例では、量子井戸層8bにおけるp型不純物およびn型不純物のドーピングにより、図14に示すように、電子と正孔とが補償され、ドーピングによるキャリアはほとんど発生しないが、イオン化したp型不純物とイオン化したn型不純物とにより、圧電効果のために発生した電位勾配がさらに減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離がさらに抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇がさらに抑制される。

【0102】

したがって、特に、MQW発光層8中にp型不純物およびn型不純物の両方を添加する場合に、それらのp型不純物およびn型不純物を不均一に添加することにより、キャリアが補償されても、電位勾配が減少する効果は大きい。また、MQW発光層8中に添加されたp型不純物の濃度とn型不純物の濃度とがほぼ等しい場合には、さらにキャリアが補償されやすいが、電位勾配が減少する効果は大きい。

【0103】

なお、例えば第2および第5の実施例を組み合わせた場合、第3および第4の実施例を組み合わせた場合においても、第6の実施例と同等の効果が生じる。

【0104】

(7) 第7の実施例

図15および図16は第7の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層8のエネルギーバンド図である。

【0105】

第7の実施例は、図15に示すように、第4の実施例と第5の実施例とを組み合わせたものである。本実施例では、MQW発光層8の $[0001]$ 方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側に、MQW発光層8に比べて大きな禁制帯幅を有し、ドナー準位が形成されたGaNからなるn-逆導電型層9が形成されている。

【0106】

さらに、本実施例では、p型不純物であるMgが障壁層8a中で量子井戸層8bの $[000-1]$ 方向側つまりn-クラッド層7側の界面と接する部分に多くドーピングされるとともに、n型不純物であるSiが障壁層8a中で量子井戸層8bの $[0001]$ 方向側つまりp-クラッド層10側の界面と接する側に多くドーピングされている。なお、本実施例では、p型不純物であるMgおよびn型不純物であるSiのドーピング濃度がほぼ等しい場合について示している。

【0107】

本実施例では、図15に示すように、量子井戸層8bの $[0001]$ 方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側にMQW発光層8に比べて大きな禁制帯幅を有するn-逆導電型層9が形成されているので、図16に示すように、 $[000-1]$ 方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したドナー準位とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した量子井戸層8bの電位勾配が減少し、エネルギーバンドの勾配も減少する。

【0108】

さらに、本実施例では、障壁層中におけるp型不純物およびn型不純物のドーピングにより、図16に示すように、電子と正孔とが補償され、ドーピングによるキャリアはほとんど発生しないが、イオン化したp型不純物とイオン化したn型不純物とにより、圧電効果のために発生した電位勾配がさらに減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離がさらに抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇がさらに抑制される。

【0109】

第4の実施例、第5の実施例および第7の実施例では、量子井戸層8b中にp型不純物およびn型不純物がドーピングされていない。したがって、量子井戸層8b

中にアクセプタ準位、ドナー準位が存在しないので、アクセプタ準位、ドナー準位または発光センターによる発光を低減できるという効果も得られる。それにより、本実施例のMQW発光層8を発光ダイオードに適用した場合には、発光スペクトル幅を狭くすることができる。その結果、色純度を向上させることが可能となる。

【0 1 1 0】

(8) 第8の実施例

図17および図18は第8の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層8のエネルギーバンド図である。

【0 1 1 1】

第8の実施例では、図17に示すように、第2の実施例と同様、MQW発光層8の[0 0 0 1]方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側に、MQW発光層8に比べて大きな禁制帯幅を有し、ドナー準位が形成されたGa_{0.99}N_{0.01}からなるn-逆導電型層9が形成されている。

【0 1 1 2】

さらに、p型不純物として例えばMgが不均一にドーピングされた第2の実施例の量子井戸層8b中に、n型不純物として例えばSiが均一にドーピングされている。Siのドーピング濃度は、 $5 \times 10^{16} \sim 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ が好ましい。

【0 1 1 3】

本実施例では、図17に示すように、量子井戸層8bの[0 0 0 1]方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側にMQW発光層8に比べて大きな禁制帯幅を有するn-逆導電型層9が形成されているので、図18に示すように、[0 0 0 -1]方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したドナー準位とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した量子井戸層8bの電位勾配が減少し、エネルギーバンドの勾配も減少する。

【0 1 1 4】

さらに、本実施例では、図17に示すようにp型不純物として例えばMgが量子井戸層8b中の[0 0 0 -1]方向側つまりn-クラッド層7側に多くドーピングされ、n型不純物として例えばSiが量子井戸層8b中に均一にドーピングされている

ので、図 18 に示すように電子および正孔は補償され、ドーピングによるキャリアはほとんど発生しないが、イオン化した p 型不純物および n 型不純物により圧電効果のために発生した電位勾配がさらに減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離がさらに抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇がさらに抑制される。

【0115】

なお、例えば第 4 の実施例の量子井戸層 8 b 中に n 型不純物を均一にドーブした場合、第 3 または第 5 の実施例の量子井戸層 8 b 中に p 型不純物を均一にドーブした場合においても、第 8 の実施例と同等の効果が生じる。

【0116】

○図 1 の半導体レーザ素子の製造方法

図 19 ～ 図 23 は図 1 の半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【0117】

図 1 の半導体レーザ素子の各窒化物系半導体層は、MOVPE 法によりサファイア基板 1 上に形成される。原料ガスとしては、例えばトリメチルアルミニウム (TMA1)、トリメチルガリウム (TMGa)、トリメチルインジウム (TMIn)、 NH_3 、 SiH_4 、シクロペンタジエニルマグネシウム (Cp_2Mg) を用いる。

【0118】

まず、図 19 に示すように、基板温度を 600°C に保ち、サファイア基板 1 上に厚さ 15 nm 程度のバッファ層 2 を形成する。次に、基板温度を 1150°C に保ち、厚さ $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 程度のアンドープ GaN 層 3、厚さ $4\text{ }\mu\text{m}$ 程度の Si ドープ GaN からなる n-コンタクト層 4 を形成する。さらに、基板温度を 880°C に保ち、厚さ $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 程度の Si ドープ $\text{Ga}_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{N}$ からなる n-クラック防止層 5 を形成する。次に、基板温度を 1150°C に保ち、厚さ $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 程度の Si ドープ $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ からなる n-クラッド層 6、および厚さ 50 nm 程度の Si ドープ GaN からなる n-クラッド層 7 を形成する。

【0119】

ここで、第 1 の実施例においては、基板温度を 880°C に保ち、厚さ 50 nm の InGaIn からなる単層構造を有する発光層 8 を n -クラッド層 7 上に形成する。

【0 1 2 0】

一方、第 2 ～第 8 の実施例においては、基板温度を 880°C に保ち、厚さ 4 nm 程度の AlGaIn からなる 5 層の障壁層 8 a と厚さ 4 nm 程度の AlGaIn の $\text{Ga}_{0.85}\text{In}_{0.15}\text{N}$ からなる 4 層の量子井戸層 8 b を交互に積層し、 GaInN からなり、多重量子井戸構造 (MQW 構造) を有する発光層 8 を形成する。この際、第 2 ～第 8 の実施例に従って、MQW 構造を有する発光層 8 中に p 型不純物または n 型不純物をドーピングする。

【0 1 2 1】

上記のようにして単層構造を有する発光層 8 または MQW 構造を有する発光層 8 を形成した後、基板温度を 880°C に保ち、厚さ 40 nm 程度の n - GaIn からなる n -逆導電型層 9 を形成し、その後基板温度を 1150°C に保ち、厚さ $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 程度の Mg ドーピング AlGaIn からなる p -クラッド層 10、厚さ 50 nm 程度の Mg ドーピング GaIn からなる p -キャップ層 11 を形成する。上記のバッファ層 2 から p -キャップ層 11 までの各層は、大気圧の MOVPE 法により形成する。なお、 n -逆導電型層 9 として基板温度を 1150°C で例えば Si がドーピングされた GaIn を形成してもよい。

【0 1 2 2】

その後、図 20 に示すように、 p -キャップ層 11 上の全面に、例えば ECR (電子サイクロトロン共鳴) プラズマ CVD 法により、厚さ $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 程度の Si_3N_4 等のシリコン窒化物からなる電流狭窄層 14 を形成する。次に、フォトリソグラフィおよび BHF (緩衝フッ酸) によるウェットエッチングで、幅 $2\text{ }\mu\text{m}$ 程度のストライプ状の領域のシリコン窒化物を除去し、 p -キャップ層 11 を露出させる。それにより、ストライプ状の電流通路 13 が形成される。

【0 1 2 3】

次に、図 21 に示すように、例えば 76 Torr の減圧 MOVPE 法により、 n -電流狭窄層 14 上およびストライプ状開口部内の p -キャップ層 11 上に厚

さ3～5 μm のMgドープGa_{0.9}Nからなるp-コンタクト層12を形成する。この際、p-キャップ層11の露出した部分に選択的にp-GaNが成長するように、成長条件を適切に調整する。例えば、基板温度を約100℃上昇させ、NH₃の流量を約3倍に増加させる。

【0124】

このような条件下で成長を行うと、まずp-キャップ層11の露出した部分にp-GaNが成長し、電流通路13にあたる部分が形成される。一方、電流狭窄層14上にはp-GaNは結晶成長しない。引き続き結晶成長を継続すると、p-GaNが電流通路13上に成長するとともに、電流通路13上に成長したp-GaNの側面から横方向に結晶成長が開始し、電流狭窄層14上にp-GaNからなるp-コンタクト層12が形成される。例えば、電流通路13にあたる部分を中心として幅約8 μm でp-コンタクト層12が形成される。

【0125】

この結果、p-キャップ層11とp-コンタクト層12とは幅2 μm 程度のストライプ状の電流通路13で接続され、p-キャップ層11とp-コンタクト層12との間には、電流通路13の部分を除いて、厚さ0.2 μm 程度のSi₃N₄からなる電流狭窄層14が形成される。

【0126】

次に、図22に示すように、メタルマスクおよびEB（電子ビーム）蒸着法を用いて、p-コンタクト層12を含む領域に、例えば幅10 μm 程度のストライプ形状で厚さ3～5 μm Ni膜を蒸着する。このNi膜をマスクとして用い、例えばCF₄をエッチングガスとして用い、反応性イオンエッチング（RIE）法により、n-コンタクト層4が露出するまで、p-コンタクト層12からn-クラック防止層5までをメサ状にエッチングする。その後、マスクとして用いたNi膜を塩酸等を用いて除去する。

【0127】

さらに、図23に示すように、Si₃N₄等の絶縁膜17をECRプラズマCVD法、フォトリソグラフィおよびエッチングによりp-コンタクト層12からn-クラック防止層5までの側面および電極形成領域を除いたn-コンタクト層

4 の上面に形成する。そして、 n -コンタクト層 4 の露出した表面上に、例えば Au/Ti からなる n 電極 1 6 を形成し、 p -コンタクト層 1 2 上に、 Au/Pd からなる p 電極 1 5 を形成する。

【0 1 2 8】

最後に、例えばへき開により、ストライプ状の電流通路 1 3 に沿った方向に共振器長 $300\mu m$ の共振器構造を形成する。それにより、図 1 の構造を有する半導体レーザ素子が作製される。

【0 1 2 9】

なお、半導体レーザ素子の共振器面に Si_3N_4 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 等を積層した誘電体多層膜等の端面高反射膜や低反射膜を形成してもよい。

【0 1 3 0】

(9) 第 9 の実施例

第 9 の実施例の半導体レーザ素子は、図 1 の半導体レーザ素子と同じ構造を有し、以下に示すように窒化物系半導体層の結晶成長方法が異なる。

【0 1 3 1】

図 1 の半導体レーザ素子の構造において、サファイア基板 1 の (0 0 0 1) 面上に、MOVPE 法により、少なくともバッファ層 2 を低温でかつアンドープ GaN 層 3 を高温で結晶成長させた後、他の層 4 ~ 1 2, 1 4 を例えば MBE 法 (分子線エピタキシ法) や HVPE 法 (ハライド気相成長法) 等の MOVPE 法以外の結晶成長方法で結晶成長させる。なお、本実施例における発光層 8 は、上記の第 1 ~ 第 8 の実施例と同様、単層構造または MWQ 構造を有する。

【0 1 3 2】

本実施例において、アンドープ GaN 層 3 ~ p -コンタクト層 1 2 までの各層はウルツ鉱構造であり、窒化物系半導体の [0 0 0 1] 方向に成長している。したがって、第 1 ~ 第 8 の実施例と同じ効果が得られる。

【0 1 3 3】

このように、サファイア基板 1 の (0 0 0 1) 面上に、MOVPE 法により低温でバッファ層 2 を成長させた後に、引き続いて高温で窒化物系半導体層を結晶

成長させると、窒化物系半導体層は $[0001]$ 方向に成長し、その後、結晶成長方法を変えても結晶成長の方位は変化せず、 $[0001]$ 方向に成長し続ける。

【0134】

上記の第1～第9の実施例のように、 n -逆導電型層9が光ガイド層としての機能も有する場合においては、発光層8と n -逆導電型層9との間に、 n -逆導電型層9に比べて大きな禁制帯幅を有する層を形成してもよい。この場合について以下で説明する。

【0135】

(10) 第10の実施例

図24は本発明の第10の実施例における半導体レーザ素子の構成を示す模式的斜視図である。

【0136】

第10の実施例の半導体レーザ素子は、発光層8と n -逆導電型層9との間に、 n -逆導電型層9に比べて大きなバンドギャップを有する AlGaIn からなるクラッド層18が形成された点を除いて、図1の半導体レーザ素子と同じ構造を有する。なお、本実施例の半導体レーザ素子は、第1の実施例の半導体レーザ素子と同様、厚さ50nmの InGaIn からなる単層構造を有する発光層8を有する。

【0137】

例えば、クラッド層18としては、厚さ1～100nmの $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ を用いる。この場合、 $0 \leq x \leq 0.1$ であることが好ましい。なお、クラッド層18の導電型は、絶縁性であってもよく、 n 型または p 型であってもよい。なお、 p 型のクラッド層18を形成する場合は、クラッド層18に形成したアクセプタ準位の濃度を、 n -逆導電型層9に形成されたドナー準位の濃度より低くする必要がある。

【0138】

図25および図26は、図24の半導体レーザ素子における n -クラッド層7、発光層8、クラッド層18、 n -逆導電型層9および p -クラッド層10のエ

エネルギーバンド図である。

【0 1 3 9】

図 2 5 に示すように、実施例 1 と同様、発光層 8 の $[0 0 0 1]$ 方向側つまりエネルギーバンド勾配の高い側に、発光層 8 に比べて大きな禁制帯幅を有し、ドナー準位が形成された GaN からなる n-逆導電型層 9 が形成されている。この n-逆導電型層 9 の禁制帯幅は、p-Al GaN からなる p-クラッド層 1 0 の禁制帯幅に比べて小さいので、n-逆導電型層 9 の屈折率は p-クラッド層 1 0 の屈折率に比べて大きくなる。したがって、n-逆導電型層 9 は光ガイド層としての機能も有している。

【0 1 4 0】

さらに、本実施例においては、上記の n-逆導電型層 9 と発光層との間に、Al GaN からなるクラッド層 1 8 が形成されている。このクラッド層 1 8 は、n-逆導電型層 9 に比べて大きな禁制帯幅を有する。したがって、このクラッド層 1 8 により、発光層 8 から光ガイド層 (n-逆導電型層 9) を分離した構造が可能となる。

【0 1 4 1】

本実施例では、第 1 の実施例と同様、図 2 5 に示すように発光層 8 の $[0 0 0 1]$ 方向側すなわちエネルギーバンド勾配の高い側に発光層 8 に比べて大きな禁制帯幅を有する n-逆導電型層 9 が形成されているので、図 2 6 に示すように $[0 0 0 -1]$ 方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したドナー準位とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した発光層 8 の電位勾配が減少し、エネルギーバンドの勾配も減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

【0 1 4 2】

なお、本実施例においては、発光層 8 が単層構造を有する場合について説明したが、第 2 ～ 第 8 の実施例のように発光層 8 が MQW 構造を有する場合においても、発光層 8 と n-逆導電型層 9 との間に n-逆導電型層 9 に比べて大きな禁制帯幅を有するクラッド層を形成することができる。この場合においても、第 2 ～

第 9 の実施例と同じ効果が得られる。

【0 1 4 3】

上記の第 1 ～第 1 0 の実施例においては、 n -逆導電型層 9 が p -クラッド層 1 0 に比べて小さな禁制帯幅を有する場合について説明したが、 n -逆導電型層 9 の禁制帯幅は p -クラッド層 1 0 の禁制帯幅と同じであってもよい。また、 n -逆導電型層 9 の禁制帯幅は p -クラッド層 1 0 の禁制帯幅に比べて大きくてもよい。なお、これらの場合においては、 n -逆導電型層 9 は光ガイド層としての機能を有さない。

【0 1 4 4】

上記の第 1 ～第 1 0 の実施例においては、発光層 8 に形成される電位勾配を低減するために、発光層 8 と p 型の半導体層との間に n 型の逆導電型層を形成する場合について説明したが、発光層 8 と n 型の半導体層との間に発光層 8 に比べて大きな禁制帯幅を有する p 型の逆導電型層を形成してもよい。この場合においても発光層 8 に形成される電位勾配を低減することが可能となる。この場合について以下に説明する。

【0 1 4 5】

(1 1) 第 1 1 の実施例

図 2 7 は本発明の第 1 1 の実施例における半導体レーザ素子の構成を示す模式的斜視図である。

【0 1 4 6】

第 1 1 の実施例の半導体レーザ素子は、以下の点を除いて、第 1 ～第 8 の実施例における図 1 の半導体レーザ素子と同様の構造を有する。なお、本実施例の半導体レーザ素子は、第 1 の実施例の半導体レーザ素子と同様、厚さ 5 0 n m の InGaIn からなる単層構造を有する発光層 8 を備える。

【0 1 4 7】

図 2 7 に示すように、第 1 1 の実施例における半導体レーザ素子においては、 n - AlGaIn からなる n -クラッド層 6 上に、アクセプタ準位が形成された GaIn からなる p -逆導電型層 1 9 が形成されている。 p -逆導電型層 1 9 の厚さは 1 ～1 0 0 n m 程度であることが好ましく、本実施例においては 4 0 n m 程度

である。また、p-逆導電型層 19 に形成されたアクセプタ準位の濃度は $1 \times 10^{17} \sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度が好ましく、例えば Mg を $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度ドーピングする。この p-逆導電型層 19 上に発光層 8 が形成され、さらに厚さ 40 nm 程度の p-GaN からなる p-クラッド層 10b が形成されている。この p-クラッド層 10b 上に p-AlGaN からなる p-クラッド層 10 が形成されている。

【0148】

図 28 および図 29 は第 11 の実施例の半導体レーザ素子における n-クラッド層 6、p-逆導電型層 19、発光層 8 および p-クラッド層 10b のエネルギーバンド図である。

【0149】

図 28 に示すように、発光層 8 の $[000-1]$ 方向側、すなわちエネルギーバンド勾配の低い側に、発光層 8 に比べて大きな禁制帯幅を有する p-逆導電型層 19 が形成されている。この p-逆導電型層 19 は、n-クラッド層 6 に比べて禁制帯幅が小さい。このため、p-逆導電型層 19 は n-クラッド層 6 に比べて屈折率が大きくなる。したがって、p-逆導電型層 19 は光ガイド層の機能も合わせて有する。

【0150】

本実施例では、図 28 に示すように発光層 8 の $[000-1]$ 方向側つまりエネルギーバンド勾配の低い側に発光層 8 に比べて大きな禁制帯幅を有する p-逆導電型層 19 が形成されているので、図 29 に示すように、 $[0001]$ 方向に正孔の移動が生じ、正孔とイオン化したアクセプタ準位とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した発光層 8 の電位勾配が減少し、エネルギーバンドの勾配も減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

【0151】

本実施例においては、発光層 8 が単層構造を有する場合について説明したが、発光層 8 が多重量子井戸構造 (MQW 構造) を有してもよい。さらに、MQW 構造を有する発光層 8 中に p 型不純物および n 型不純物の少なくとも一方が不均一

にドーピングされてもよい。この場合においては、発光層 8 の電位勾配をさらに低減することができる。

【0152】

また、本実施例において、 n -クラッド層 6 と p -逆導電型層 19 との間に、 $AlGaIn$ からなり p -逆導電型層 19 に比べて大きな禁制帯幅を有するクラッド層を形成してもよい。このクラッド層により、光ガイド層としての機能を有する p -逆導電型層 19 を発光層 8 から分離した構造が可能となる。このような p -逆導電型層 19 に比べて大きな禁制帯幅を有するクラッド層としては、例えば厚さ $1 \sim 100 \text{ nm}$ の $Al_x Ga_{1-x} N$ を用いる。この場合、 $0 \leq x \leq 0.1$ であることが好ましい。なお、このようなクラッド層の導電型は、絶縁性であってもよく、 n 型または p 型であってもよい。なお、 n 型のクラッド層を形成する場合には、このクラッド層に形成されたドナー準位の濃度を、 p -逆導電型層 19 に形成されたアクセプタ準位の濃度より低くする必要がある。

【0153】

さらに、本実施例においては、 p -逆導電型層 19 が n -クラッド層 6 に比べて小さな禁制帯幅を有する場合について説明したが、 p -逆導電型層 19 の禁制帯幅は n -クラッド層 6 の禁制帯幅と同じであってもよい。また、 p -逆導電型層 19 の幅は n -クラッド層 6 の禁制帯幅に比べて大きくてもよい。なお、これらの場合においては、 p -逆導電型層 19 が光ガイド層としての機能を有さない。

【0154】

上記の第 1 ～ 第 11 の実施例においては半導体レーザ素子が n 型の逆導電型層または p 型の逆導電型層を有する場合について説明したが、 n 型の逆導電型層と p 型の逆導電型層とを同時に形成してもよい。例えば、第 1 の実施例と第 11 の実施例とを組み合わせてもよい。この場合においては、発光効率の低下を抑制する効果がより大きくなる。

【0155】

上記の第 1 ～ 第 11 の実施例においては、 n -逆導電型層 9 および p -逆導電型層 19 が GaN から構成される場合について説明したが、 n 型の逆導電型層お

【0160】

上記第1～第11の実施例では、基板としてサファイア基板1を用いているが、窒化物系半導体層がウルツ鉱構造であれば、スピネル、SiC、Si、GaAs、GaP、InP、GaN等の基板を用いてもよい。

【0161】

また、上記第1～第11の実施例では、面内方向に圧縮歪を有するとともに界面に垂直な方向に伸張する歪を有するウルツ鉱構造の発光層8について説明したが、面内方向に伸張する歪を有するとともに界面に垂直な方向に圧縮歪を有するウルツ鉱構造の発光層8を有し、 $[0001]$ 方向側にn型層を有し、 $[000-1]$ 方向側にp型層を有している発光素子の場合、n型の逆導電型層またはp型の逆導電型層を形成する位置を発光層の中心における (0001) 面に関して第1～第11の実施例と反対にすればよい。さらに、MQW構造を有する発光層にn型不純物およびp型不純物の少なくとも一方を不均一に添加する場合においては、p型不純物またはn型不純物のドーピングの分布位置を量子井戸層の中心における (0001) 面に関して第2～第8の実施例と反対にすればよい。

【0162】

さらに、ウルツ鉱型のZnSeを代表とするII-VI族化合物半導体を始めとするウルツ鉱構造または六方晶構造を有する半導体であれば同じ効果が得られる。ただし、II-VI族化合物半導体およびCuClを代表とするI-VII族化合物半導体の場合には、電位勾配が逆になる。

【0163】

加えて、発光層における界面に垂直な方向としては、歪により電位勾配の発生する方向であれば、発光層の面方位は (0001) 面に限られるものではない。歪発光層の面方位が $[0001]$ 軸を面内に含む面方位以外であれば、いかなる面方位でも、歪により電位勾配が発光層に垂直な方向に発生する。すなわち、歪量子井戸の面方位が一般式 $(HKL0)$ 面で表される面方位以外であれば、いかなる面方位でも、圧電効果が発生する。ここで、H、KおよびLは、 $H+K+L=0$ を満足し、かつ $H=K=L=0$ を除く任意の数である。上記の $(HKL0)$ 面は、例えば $(1-100)$ 面および $(11-20)$ 面である。特に、 (0001)

面を主面とする歪発光層において、界面に垂直な方向に電位勾配を発生させる圧電効果が最も大きい。なお、歪により電位勾配の発生する発光層の面方位については後述する。

【0 1 6 4】

(B) 第 2 の実施の形態

第 2 の実施の形態の発光素子は、(1 1 1) 面を主面とする閃亜鉛鉱構造の発光層を有する。この発光層は、発光層の面に垂直な方向（界面に垂直な方向）に歪を有する。このような発光層中には、圧電効果により電位勾配が形成される。

【0 1 6 5】

ここで、歪を有する発光層は、単層構造であってもよい。あるいは、1つの量子井戸層が2つの障壁層の間に挟まれた単一量子井戸構造（SQW構造）であってもよく、また2つ以上の井戸層と3つ以上の障壁層とが交互に積層されてなる多重量子井戸構造（MQW構造）であってもよい。SQW構造およびMQW構造のような量子井戸構造を有する発光層においては、井戸層が歪を有しており、井戸層内に圧電効果により電位勾配が形成される。

【0 1 6 6】

発光層はp型層とn型層とに挟まれるように配置される。p型層にはp電極が形成されており、p電極からp型層に正孔が注入される。n型層にはn電極が形成されており、n電極からn型層に電子が注入される。

【0 1 6 7】

III - V族化合物半導体において、発光層の面内方向（界面に平行な方向）に伸張する歪を有し、発光層の界面に垂直な方向に圧縮歪を有する場合、圧電効果により発生した発光層中の電位勾配において、[1 1 1] 方向側の電位が高く、[-1-1-1] 側の電位が低い。このような歪を発光層に有し、[-1-1-1] 方向側にp型層を有し、[1 1 1] 方向側にn型層を有している発光素子において、発光層における電位勾配はn型層側の方がp型層側に比べて低い。なお、発光層は量子井戸構造を有する場合においては、量子井戸層内における電位勾配がn型層側の方がp型層側に比べて低い。圧電効果のために発生した電位勾配を減少させるためには、p型層と発光層との間に、発光層に比べて大きな禁制帯幅を有するn

型の逆導電型層を形成する。あるいは、 n 型層と発光層との間に、発光層に比べて禁制帯幅を有する p 型の逆導電型層を形成する。このような方法により、発光層が単層構造を有する場合および量子井戸構造を有する場合のいずれにおいても同様の効果が得られる。

【0168】

さらに、発光層が量子井戸構造を有する場合においては、量子井戸層にアクセプタ準位あるいはドナー準位を不均一に形成することで、圧電効果のために発生した発光層の電位勾配をさらに低減することができる。この場合、アクセプタ準位を量子井戸層中の $[111]$ 方向側の部分に多く形成し、または障壁層中で量子井戸層の $[111]$ 方向側の界面と接する部分に多く形成する。あるいは、ドナー準位を量子井戸層中の $[-1-1-1]$ 方向側の部分に多く形成し、または障壁層中で量子井戸層の $[-1-1-1]$ 方向側の界面と接する部分に多く形成する。

【0169】

逆に、III - V 族化合物半導体において、発光層の面内方向（界面に平行な方向）に圧縮歪を有し、発光層の界面に垂直な方向に伸張する歪を有する場合、圧電効果により発生した発光層中の電位勾配において、 $[-1-1-1]$ 方向側の電位が高く、 $[111]$ 側の電位が低い。このような歪を発光層に有し、 $[111]$ 方向側に p 型層を有し、 $[-1-1-1]$ 方向側に n 型層を有している発光素子においては、発光層における電位勾配は n 型層側の方が p 型層側に比べて低い。なお、発光層は量子井戸構造を有する場合においては、量子井戸層内における電位勾配が n 型層側の方が p 型層側に比べて低い。圧電効果のために発生した電位勾配を減少させるためには、 p 型層と発光層との間に、発光層に比べて大きな禁制帯幅を有する n 型の逆導電型層を形成する。あるいは、 n 型層と発光層との間に、発光層に比べて大きな禁制帯幅を有する p 型の逆導電型層を形成する。このような方法により、発光層が単層構造を有する場合および量子井戸構造を有する場合のいずれにおいても同様の効果が得られる。

【0170】

さらに、発光層が量子井戸構造を有する場合においては、量子井戸層にアクセプタ準位あるいはドナー準位を不均一に形成することで、圧電効果のために発生

した発光層の電位勾配をさらに低減することができる。この場合、アクセプタ準位を量子井戸層中の $[-1-1-1]$ 方向側の部分に多く形成し、または障壁層中で量子井戸層の $[-1-1-1]$ 方向側の界面と接する部分に多く形成する。あるいは、ドナー準位を量子井戸層中の $[1 1 1]$ 方向側の部分に多く形成し、または障壁層中で量子井戸層の $[1 1 1]$ 方向側の界面と接する部分に多く形成する。

【0 1 7 1】

一方、II-VI族化合物半導体およびI-VII 族化合物半導体において、発光層の面内方向（界面に平行な方向）に伸張する歪を有し、発光層の界面に垂直な方向に圧縮歪を有する場合、圧電効果により発光層中に発生した電位勾配において、

$[-1-1-1]$ 方向側の電位が高く、 $[1 1 1]$ 側の電位が低い。このような歪を発光素子に有し、 $[1 1 1]$ 方向側に p 型層を有し、 $[-1-1-1]$ 方向側に n 型層を有している発光素子において、圧電効果のために発生した電位勾配を減少させるためには、p 型層と発光層との間に、発光層より大きな禁制帯幅を有する n 型の逆導電型層を形成する。あるいは、n 型層と発光層との間に、発光層に比べて大きな禁制帯幅を有する p 型の逆導電型層を形成する。このような方法により、発光層が単層構造を有する場合および量子井戸構造を有する場合のいずれにおいても同様の効果が得られる。

【0 1 7 2】

さらに、発光層が量子井戸構造を有する場合においては、量子井戸層にアクセプタ準位あるいはドナー準位を不均一に形成することで、圧電効果のために発生した発光層の電位勾配をさらに低減することができる。この場合、アクセプタ準位を量子井戸層中の $[-1-1-1]$ 方向側の部分に多く形成し、または障壁層中で量子井戸層の $[-1-1-1]$ 方向側の界面と接する部分に多く形成する。あるいは、ドナー準位を量子井戸層中の $[1 1 1]$ 方向側の部分に多く形成し、または障壁層中で量子井戸層の $[1 1 1]$ 方向側の界面と接する部分に多く形成する。

【0 1 7 3】

逆に、II-VI族化合物半導体およびI-VII 族化合物半導体において、発光層の面内方向（界面に平行な方向）に圧縮歪を有し、発光層の界面に垂直な方向に伸張する歪を有する場合、圧電効果により発光層中に発生した電位勾配において、

〔111〕方向側の電位が高く、 $[-1-1-1]$ 側の電位が低い。このような歪を発光層に有し、 $[-1-1-1]$ 方向側にp型層を有し、〔111〕方向側にn型層を有している発光素子においては、発光層における電位勾配はn型層側の方がp型層側に比べて低い。なお、発光層は量子井戸構造を有する場合においては、量子井戸層内における電位勾配がn型層側の方がp型層側に比べて低い。圧電効果のために発生した電位勾配を減少させるためには、p型層と発光層との間に、発光層より禁制帯幅の広いn型の逆導電型層を形成する。あるいは、n型層と発光層との間に、発光層より禁制帯幅の広いp型の逆導電型層を形成する。このような方法により、発光層が単層構造を有する場合および量子井戸構造を有する場合のいずれにおいても同様の効果が得られる。

【0174】

さらに、発光層が量子井戸構造を有する場合においては、量子井戸層にアクセプタ準位またはドナー準位を不均一に形成することで、圧電効果のために発生した発光層の電位勾配をさらに低減することができる。この場合、アクセプタ準位を量子井戸層中の〔111〕方向側の部分に多く形成し、または障壁層中で量子井戸層の〔111〕方向側の界面と接する部分に多く形成する。あるいは、ドナー準位を量子井戸層中の $[-1-1-1]$ 方向側の部分に多く形成し、または障壁層中で量子井戸層の $[-1-1-1]$ 方向側の界面と接する部分に多く形成する。

【0175】

発光層における界面に垂直な方向としては、歪により電位勾配の発生する方向であれば、発光層の面方位は(111)面と等価な面方位に限られるものではない。歪発光層の面方位が〔100〕軸を面内に含む面方位およびこれと等価な面方位以外であれば、いかなる面方位でも、歪により電位勾配が発光層の界面に垂直な方向に発生する。すなわち、歪発光層の面方位が一般式(OMN)面で表される面方位およびこれと等価な面方位以外であれば、いかなる面方位でも、圧電効果が発生する。ここで、MおよびNは、 $M=N=0$ を除く任意の数である。上記の(OMN)面は、例えば(001)面および(011)面である。特に、(111)面を主面とする歪発光層において、発光層の界面に垂直な方向に電位勾配を発生させる圧電効果が最も大きい。なお、歪により電位勾配の発生する発光

層の面方位については後述する。

【0176】

(12) 第12の実施例

図30は本発明の第12の実施例における埋め込みリッジ構造のAlGaInP系半導体レーザ素子の構造を示す断面図である。第12の実施例の半導体レーザ素子は、多重量子井戸構造(MQW構造)を有するMQW発光層を有する。図31および図32は第12の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【0177】

図30において、n-GaAs基板21は、面方位が(111)Bの結晶成長面を有する。n-GaAs基板21上にn-Ga_{0.51}In_{0.49}Pからなるn-バッファ層22、n-(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.51}In_{0.49}Pからなるn-クラッド層23、およびMQW発光層24が順に形成されている。

【0178】

MQW発光層24は、図31に示すように、p-(Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.51}In_{0.49}Pからなる光ガイド層24c上に(AI_{0.5}Ga_{0.5})_{0.45}In_{0.55}Pからなる5層の圧縮歪障壁層24aおよびGa_{0.6}In_{0.4}Pからなる4層の引張り歪井戸層24bが交互に積層されてなる。本実施例においては、この光ガイド層24cがp型の逆導電型層に相当する。

【0179】

MQW発光層24上には、n-(Al_{0.57}Ga_{0.43})_{0.51}In_{0.49}Pからなる光ガイド層25が形成されている。本実施例においては、この光ガイド層25がn型の逆導電型層に相当する。光ガイド層25上には多重量子障壁層26が形成されている。多重量子障壁層26は、Ga_{0.51}In_{0.49}Pからなる10層の井戸層および(AI_{0.7}Ga_{0.3})_{0.51}In_{0.49}Pからなる10層の障壁層が交互に積層されてなる。この多重量子障壁層26は、温度特性の改善のために設けられている。

【0180】

多重量子障壁層26上には、p-(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.51}In_{0.49}Pからな

る p-クラッド層 27 が形成されている。p-クラッド層 27 の上部領域はメサエッチング等によりストライプ状のリッジ部に形成されている。リッジ部の幅は $5\mu\text{m}$ である。p-クラッド層 27 のリッジ部上には $\text{p-Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ からなる p-コンタクト層 28 が形成されている。

【0181】

p-クラッド層 27 の両側には、 n-GaAs からなる n-電流ブロック層 29 が形成され、p-コンタクト層 28 上および n-電流ブロック層 29 上には p-GaAs からなる p-キャップ層 30 が形成されている。 n-GaAs 基板 21 の下面に n 電極 32 が形成され、p-キャップ層 30 の上面に p 電極 31 が形成されている。

【0182】

表 1 に図 30 の半導体レーザ素子における各層の材料および膜厚を示す。

【0183】

【表 1】

		材料	膜厚
n-バッファ層22		$n\text{-Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	$0.3\mu\text{m}$
n-クラッド層23		$n\text{-(Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	$0.8\mu\text{m}$
MQW 活性層 24	光ガイド層 24c	$p\text{-(Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	50nm
	障壁層24a	$(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.45}\text{In}_{0.55}\text{P}$	各4nm
	井戸層24b	$\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$	各10nm
光ガイド層25		$n\text{-(Al}_{0.57}\text{Ga}_{0.43})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	30nm
多重量子 障壁層26	井戸層	$\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	各1.1nm
	障壁層	$(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	各1.7nm
p-クラッド層27		$p\text{-(Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	$0.8\mu\text{m}$
p-コンタクト層28		$p\text{-Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	$0.1\mu\text{m}$
n-電流ブロック層29		n-GaAs	$0.8\mu\text{m}$
p-キャップ層30		p-GaAs	$3\mu\text{m}$

【0184】

この半導体レーザ素子において、n-GaAs基板21上の各層22～30はMOCVD法（有機金属化学的気相成長法）等により形成される。

【0185】

圧縮歪障壁層24aの格子定数はn-GaAs基板21の格子定数よりも大きく設定されている。それにより、圧縮歪障壁層24aはn-GaAs基板21に対して圧縮歪を有する。引張り歪井戸層24bの格子定数はn-GaAs基板21の格子定数よりも小さく設定されている。それにより、引張り歪井戸層24bはn-GaAs基板21に対して引張り歪を有する。

【0186】

図31に示すように、本実施例においては、p型の逆導電型層として、n-ク

ラッド層 2 3 に比べて禁制帯幅が小さくかつ圧縮歪障壁層 2 4 a および引張り歪井戸層 2 4 b に比べて禁制帯幅の大きい p - 光ガイド層 2 4 c が形成されている。また、n 型の逆導電型層として、圧縮歪障壁層 2 4 a および引張り歪井戸層 2 4 b に比べて禁制帯幅が大きく多重量子障壁層 2 6 に比べて禁制帯幅が小さな n - 光ガイド層 2 5 が形成されている。

【0 1 8 7】

さらに、n 型不純物として例えば S e が圧縮歪障壁層 2 4 a 中で引張り歪井戸層 2 4 b の $[-1-1-1]$ 方向側つまり光ガイド層 2 5 側の界面と接する部分に多くドーピングされ、p 型不純物として例えば Z n が圧縮歪障壁層 2 4 a 中で引張り歪井戸層 2 4 b の $[1 1 1]$ 方向側つまり光ガイド層 2 4 c 側の界面と接する部分に多くドーピングされ、変調ドーピング構造となっている。本実施例では、n 型不純物および p 型不純物のドーピング濃度がほぼ等しい場合について示している。

【0 1 8 8】

なお、本実施例では、MQW 発光層 2 4 中の量子井戸面内に関して井戸層 2 4 b が引張り歪を有し、障壁層 2 4 a が圧縮歪を有するため、障壁層 2 4 a には井戸層 2 4 b とは反対の電位勾配が発生する。それにより、MQW 発光層 2 4 のエネルギーバンドにおいて、障壁層 2 4 a のエネルギーバンドの勾配が $[1 1 1]$ 方向側が $[-1-1-1]$ 方向側に比べて高くなり、井戸層 2 4 b のエネルギーバンド勾配は、 $[-1-1-1]$ 方向側が $[1 1 1]$ 方向側に比べて高くなる。

【0 1 8 9】

本実施例では、図 3 2 に示すように、電子および正孔が補償され、ドーピングによるキャリアはほとんど発生しないが、イオン化した p 型不純物とイオン化した n 型不純物とにより引張り歪井戸層 2 4 b の電位勾配が減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

【0 1 9 0】

(1 3) 第 1 3 の実施例

図 3 3 は本発明の第 1 3 の実施例における Z n S e 系半導体レーザ素子の構造を示す断面図である。第 1 3 の実施例の半導体レーザ素子は、多重量子井戸構造

(MQW構造)を有するMQW発光層を有する。図34および図35は第13の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【0191】

図33において、 n -GaAs基板41の(111)B面上に、 n -GaAsからなる n -第1バッファ層42、 n -ZnSeからなる n -第2バッファ層43、 n - $Zn_{0.9}Mg_{0.1}S_{0.15}Se_{0.85}$ からなる n -クラッド層44、 p - $ZnS_{0.15}Se_{0.85}$ からなる p -逆導電型層45およびMQW発光層46が順に形成されている。

【0192】

MQW発光層46は、図34に示すように、 $ZnS_{0.1}Se_{0.9}$ からなる5層の引張り歪障壁層45aおよび $Zn_{0.7}Cd_{0.3}Se$ からなる4層の圧縮歪井戸層45bが交互に積層されてなる。

【0193】

MQW発光層46上には、 n - $ZnS_{0.15}Se_{0.85}$ からなる n -逆導電型層47および p - $Zn_{0.9}Mg_{0.1}S_{0.15}Se_{0.85}$ からなる p -クラッド層48が形成されている。 p -クラッド層48の上部領域はストライプ状のリッジ部となっている。

【0194】

p -クラッド層48のリッジ部上には、 p -ZnSeからなる p -コンタクト層49が形成され、 p -クラッド層48のリッジ部および p -コンタクト層49の両側には SiO_2 膜50が形成されている。 n -GaAs基板41の下面に n 電極51が形成され、 p -コンタクト層49上および SiO_2 層50上に p 電極52が形成されている。

【0195】

表2に図33の半導体レーザ素子における各層の材料および膜厚を示す。

【0196】

【表 2】

材料		膜厚
n-第1バッド層42	n-GaAs	1 μ m
n-第2バッド層43	n-ZnSe	1 μ m
n-クラッド層44	n-Zn _{0.9} Mg _{0.1} S _{0.15} Se _{0.85}	1 μ m
p-逆導電型層45	p-ZnS _{0.15} Se _{0.85}	30nm
MQW 活性層 46	引張り歪障壁層46a	ZnS _{0.1} Se _{0.9}
	圧縮歪井戸層46b	Zn _{0.7} Cd _{0.3} Se
n-逆導電型層47	n-ZnS _{0.15} Se _{0.85}	30nm
p-クラッド層48	p-Zn _{0.9} Mg _{0.1} S _{0.15} Se _{0.85}	1 μ m
p-コンタクト層49	p-ZnSe	0.5 μ m
SiO ₂ 層50	SiO ₂	0.5 μ m

【0197】

図34に示すように、本実施例においては、n-クラッド層44に比べて禁制帯幅が小さくかつ引張り歪障壁層46aおよび圧縮歪井戸層46bに比べて禁制帯幅の大きなp-逆導電型層45が形成されるとともに、p-クラッド層48に比べて禁制帯幅が小さくかつ引張り歪障壁層46aおよび圧縮歪井戸層46bに比べて禁制帯幅の大きなn-逆導電型層47が形成されている。また、n型不純物として例えばC1が引張り歪障壁層46a中で圧縮歪井戸層46bの[-1-1-1]方向側つまりp-クラッド層48側の界面と接する部分に多くドーピングされ、p型不純物として例えば窒素が引張り歪障壁層46a中で圧縮歪井戸層46bの[111]方向側つまりn-クラッド層44側の界面と接する部分に多くドーピングされ、変調ドーピング構造となっている。本実施例では、n型不純物およびp型不純物のドーピング濃度がほぼ等しい場合について示している。

【0198】

なお、本実施例では、MQW発光層46中の量子井戸面内に関して井戸層46

b が圧縮歪を有し、障壁層 4 6 a が引張り歪を有するため、障壁層 4 6 a には井戸層 4 6 b とは反対の電位勾配が発生する。それにより、MQW 発光層 4 6 のエネルギーバンドにおいて、障壁層 4 6 a のエネルギーバンドの勾配は、 $[1\ 1\ 1]$ 方向側が $[-1-1-1]$ 方向側に比べて高くなり、井戸層 4 6 b のエネルギーバンドの勾配は $[-1-1-1]$ 方向側が $[1\ 1\ 1]$ 方向側に比べて高くなる。

【0 1 9 9】

本実施例では、図 3 5 に示すように、電子および正孔が補償され、ドーピングによるキャリアがほとんど発生しないが、イオン化した p 型不純物とイオン化した n 型不純物とにより圧縮歪井戸層 4 6 b の電位勾配が減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

【0 2 0 0】

(C) 第 3 の実施の形態

第 3 の実施の形態の発光素子は、量子細線構造の MQW 発光層を有する。

【0 2 0 1】

(1 4) 第 1 4 の実施例

図 3 6 ~ 図 4 0 は第 1 4 の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示し、図 3 6 は模式的工程断面図、図 3 7 は MQW 発光層の拡大断面図、図 3 8 (a), (b) は量子細線が形成された MQW 発光層のそれぞれ拡大断面図および模式的平面図、図 3 9 は量子細線構造の MQW 発光層の拡大断面図、図 4 0 の模式的工程断面図である。

【0 2 0 2】

まず、図 3 6 に示すように、図 1 9 の工程と同様にして、サファイア基板 1 の $(0\ 0\ 0\ 1)$ 面上に、MOVPE 法により、バッファ層 2、アンドープ GaN 層 3、n-コンタクト層 4、n-クラック防止層 5、n-クラッド層 6、n-クラッド層 7 および MQW 発光層 8 を成長させる。

【0 2 0 3】

図 3 7 に示すように、MQW 発光層 8 は、複数の障壁層 8 a と複数の量子井戸層 8 b とが交互に積層されてなる。MQW 発光層 8 への不純物のドーピング方法

は、第 2 ～ 第 8 の実施例と同様である。

【0204】

次に、図 3 8 に示すように、集束イオンビーム (FIB) 等により、MQW 発光層 8 の一部を n-クラッド層 7 に達するまで線状に削り、MQW 発光層 8 を線状に加工する。MQW 発光層 8 の残存する部分の幅は例えば 5 nm 程度であり、FIB により削った部分の幅は例えば 20 nm 程度とする。

【0205】

その後、図 3 9 に示すように、MQW 発光層 8 をアンドープ GaN 層 8 c で埋め込む。それにより、量子細線構造を有する MQW 発光層 8 0 が形成される。

【0206】

さらに、図 4 0 に示すように、MQW 発光層 8 0 上に、図 1 9 の工程と同様にして、MOVPE 法により、n-逆導電型層 9、p-クラッド層 10 および p-キャップ層 11 を順に成長させる。以後の工程は、図 2 0 ～ 図 2 3 に示した工程と同様である。

【0207】

本実施例の半導体レーザ素子では、量子細線構造を有する MQW 発光層 8 0 において、基板上の結晶成長方向に電位勾配が発生する。そこで、第 2 ～ 第 8 の実施例と同様に、MQW 発光層 8 0 と p-クラッド層 10 との間に n-逆導電型層 9 を形成するとともに、基板上の結晶成長方向に関して不純物を不均一にドーピングする。それにより、量子細線構造の MQW 発光層 8 0 において発生した電位勾配が減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

【0208】

なお、量子細線構造の発光層 8 0 において、電位勾配の発生する方向は、基板上の結晶成長方向に限らない。基板の面方位、量子細線の方位、量子細線の形状等により、基板の面内方向に電位勾配が発生する場合がある。このような場合には、イオン注入等の方法で、基板の面内方向に関してドーピングを不均一にすればよい。

【0209】

なお、上記第 1 ～第 1 4 の実施例では、本発明を半導体レーザ素子に適用した場合について説明したが、本発明は、発光ダイオード等の他の発光素子にも適用することができる。

【0 2 1 0】

第 1 ～第 3 の実施の形態において、アクセプタ準位あるいはドナー準位を形成する方法として不純物をドーピングする方法の他に、空格子等の格子欠陥によりアクセプタ準位あるいはドナー準位を形成する方法でも、同様の効果を有する。

【0 2 1 1】

○歪により電位勾配の発生する発光層の面方位

発光層の界面に垂直な方向の分極は、PIEZOELECTRICITY Vol. 1 (New Revised Edition) by W.G.CADY Dover Publications, Inc. New York 1964 等の文献にしたがって、計算することができる。

【0 2 1 2】

図 4 1 において、z 軸を界面に垂直な方向とする。X Y Z 座標系を Z 軸を回転軸として角度 α 回転させる。回転後の座標軸は、X 軸が ξ 軸に移り、Y 軸が y 軸に移る。

【0 2 1 3】

ξ y Z 座標系を y 軸を回転軸として角度 β 回転させる。回転後の座標軸は、 ξ 軸が x 軸に移り、Z 軸が z 軸に移る。

【0 2 1 4】

ウルツ鉱型結晶では、X 軸を結晶の $[2-1-10]$ 軸とし、Y 軸を $[0 1-10]$ 軸とし、Z 軸を $[0 0 0 1]$ 軸とする。また、閃亜鉛鉱型結晶では、X 軸を結晶の $[1 0 0]$ 軸とし、Y 軸を $[0 1 0]$ 軸とし、Z 軸を $[0 0 1]$ 軸とする。

【0 2 1 5】

ここで、z 軸方向の分極を P_z とし、歪テンソルを ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{yz} 、 ε_{xz} 、 ε_{xy} とし、圧電係数 (piezoelectric stress coefficients) を e_{31} 、 e_{33} 、 e_{15} 、 e_{14} とする。

【0 2 1 6】

第 1 ～第 1 3 の実施例のような通常の単層構造および量子井戸構造では電位勾

配は z 軸方向の分極 P_z に比例し、 $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy}$ 、 $\epsilon_{yz} = \epsilon_{xz} = \epsilon_{xy} = 0$ であり、 ϵ_{xx} と ϵ_{zz} の符号が異なる。

【0 2 1 7】

ウルツ鉱型結晶では、 z 軸方向の分極 P_z は次式で表される。

$$P_z = \epsilon_{xx} \cos \beta (e_{31} \cos^2 \beta + e_{33} \sin^2 \beta - e_{15} \sin^2 \beta) + \epsilon_{yy} e_{31} \cos \beta + \epsilon_{zz} \cos \beta (e_{31} \sin^2 \beta + e_{33} \cos^2 \beta + e_{15} \sin^2 \beta) + \epsilon_{xz} \sin \beta (2 e_{31} \cos^2 \beta - 2 e_{33} \cos^2 \beta + e_{15} \sin^2 \beta) \cdots (1)$$

z 軸方向の電極 P_z は α に無関係である。上式 (1) から、ウルツ鉱型結晶では、例えば角度 β が 90° となる場合に、 z 軸方向の分極 P_z が 0 となる。すなわち、図 3 6 の z 軸が XY 平面上にある場合に界面に垂直な方向に歪による電位勾配が発生しない。したがって、前述したように、一般式 $(HKL0)$ 面 (H 、 K および L は、 $H+K+L=0$ を満足し、かつ $H=K=L=0$ を除く任意の数) で表される面方位では、界面に垂直な方向に電位勾配が発生せず、それ以外の面方位では界面に垂直な方向に電位勾配が発生する。

【0 2 1 8】

また、閃亜鉛鉱型結晶では、 z 軸方向の分極 P_z は次式で表される。

$$P_z = \epsilon_{xx} e_{14} \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) - \epsilon_{yy} e_{14} \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta + 3 \epsilon_{zz} e_{14} \sin \alpha \cos \alpha \sin^2 \beta \cos \beta + 2 \epsilon_{yz} e_{14} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \sin \beta \cos \beta + 2 \epsilon_{xz} e_{14} \sin \alpha \cos \alpha \sin \beta (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) + 2 \epsilon_{xy} e_{14} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \cdots (2)$$

上式 (2) から、閃亜鉛鉱型結晶では、例えば角度 α が 0° または 90° となる場合または角度 β が 0° または 90° となる場合に、 z 方向の分極 P_z が 0 となる。したがって、前述したように、一般式 $(0MN)$ 面 (M および N は、 $M=N=0$ を除く任意の数) で表される面方位およびこれと等価な面方位では、界面に垂直な方向に電位勾配が発生せず、それ以外の面方位では、界面に垂直な方向に電位勾配が発生する。

【0 2 1 9】

圧電係数の値は、LANDOLT-BORNSTEIN Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology New Series Group III; Crystal and Solid State Physics Vol. 17a, Edited by O. Madelung, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg 1982 等に記載されている。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

本発明の第 1 ～ 第 8 の実施例における半導体レーザ素子の構成を示す模式的斜視図である。

【図 2】

第 1 の実施例の半導体レーザ素子における発光層のエネルギーバンド図である。

【図 3】

第 1 の実施例の半導体レーザ素子における発光層のエネルギーバンド図である。

【図 4】

第 2 ～ 8 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 5】

第 2 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 6】

第 2 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 7】

第 3 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 8】

第 3 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 9】

第 4 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 1 0】

第 4 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 1 1】

第 5 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 1 2】

第 5 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 1 3】

第 6 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 1 4】

第 6 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 1 5】

第 7 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 1 6】

第 7 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 1 7】

第 8 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 1 8】

第 8 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図

である。

【図 1 9】

図 1 の半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図 2 0】

図 1 の半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図 2 1】

図 1 の半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図 2 2】

図 1 の半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図 2 3】

図 1 の半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図 2 4】

第 1 0 の実施例における半導体レーザ素子の構成を示す模式的斜視図である。

【図 2 5】

第 1 0 の実施例の半導体レーザ素子における発光層のエネルギーバンド図である。

【図 2 6】

第 1 0 の実施例の半導体レーザ素子における発光層のエネルギーバンド図である。

【図 2 7】

第 1 1 の実施例における半導体レーザ素子の構成を示す模式的斜視図である。

【図 2 8】

第 1 1 の実施例の半導体レーザ素子における発光層のエネルギーバンド図である。

【図 2 9】

第 1 1 の実施例の半導体レーザ素子における発光層のエネルギーバンド図である。

【図 3 0】

本発明の第 1 2 の実施例における埋め込みリッジ構造の AlGaInP 系半導

体レーザ素子の構造を示す模式的断面図である。

【図 3 1】

第 1 2 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 3 2】

第 1 2 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 3 3】

本発明の第 1 3 の実施例における ZnSe 系半導体レーザ素子の構造を示す模式的断面図である。

【図 3 4】

第 1 3 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 3 5】

第 1 3 の実施例の半導体レーザ素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 3 6】

第 1 4 の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図 3 7】

第 1 4 の実施例における半導体レーザ素子の MQW 発光層の拡大断面図である。

【図 3 8】

第 1 4 の実施例における半導体レーザ素子の量子細線構造が形成された MQW 発光層の拡大断面図および模式的平面図である。

【図 3 9】

第 1 4 の実施例における半導体レーザ素子の量子細線構造の MQW 発光層の拡大断面図である。

【図 4 0】

第 1 4 の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図 4 1】

歪により電位勾配が発生する量子井戸層の面方位を説明するための図である。

【図 4 2】

従来の GaN 系半導体発光素子の構成を示す模式的断面図である。

【図 4 3】

従来の半導体発光素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【図 4 4】

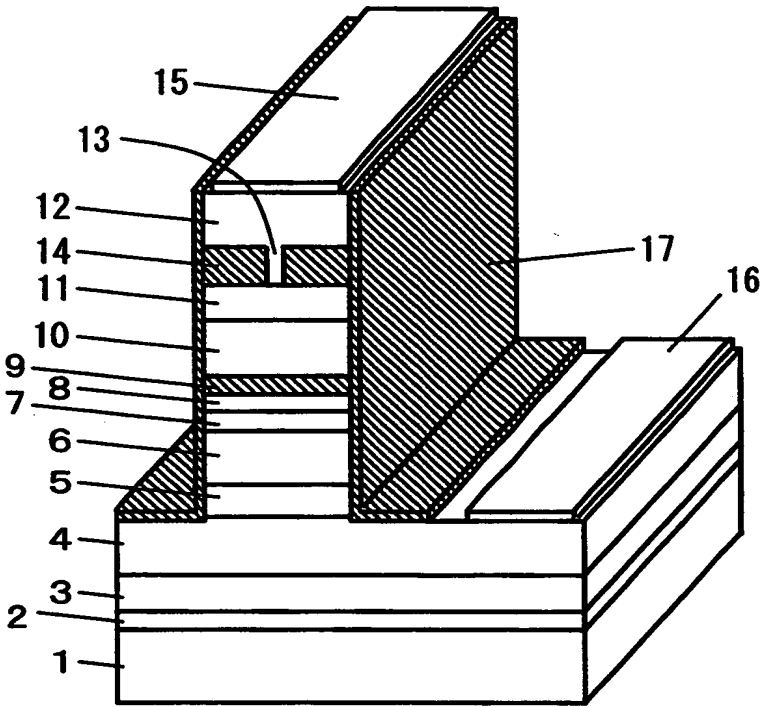
従来の半導体発光素子における MQW 発光層のエネルギーバンド図である。

【符号の説明】

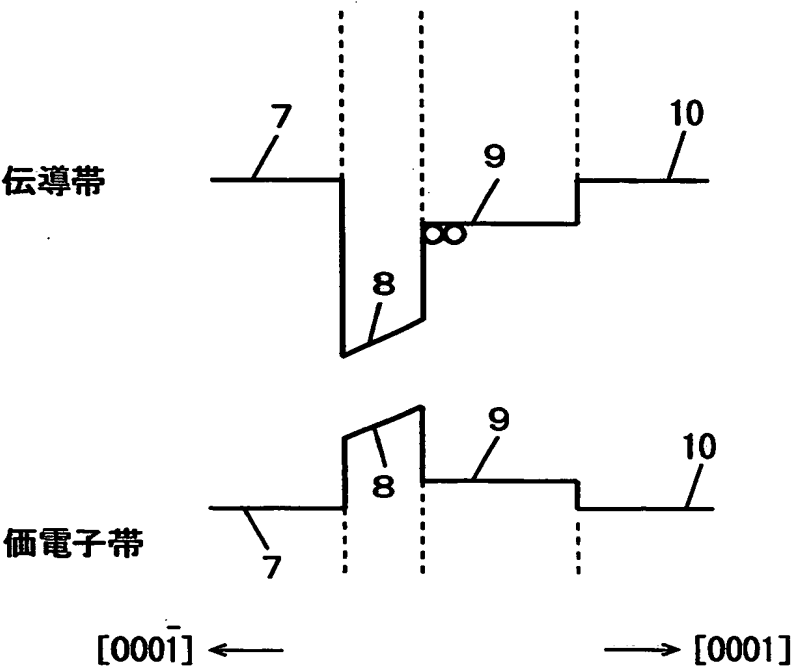
- 1 サファイア基板
- 6, 7 n-クラッド層
- 8, 24, 46, 80 発光層
- 8a, 24a, 46a 障壁層
- 8b 量子井戸層
- 9, 47 n-逆導電型層
- 10 p-クラッド層
- 19, 45 p-逆導電型層
- 23, 44 n-クラッド層
- 27, 48 p-クラッド層
- 24b, 46b 井戸層

【書類名】 図面

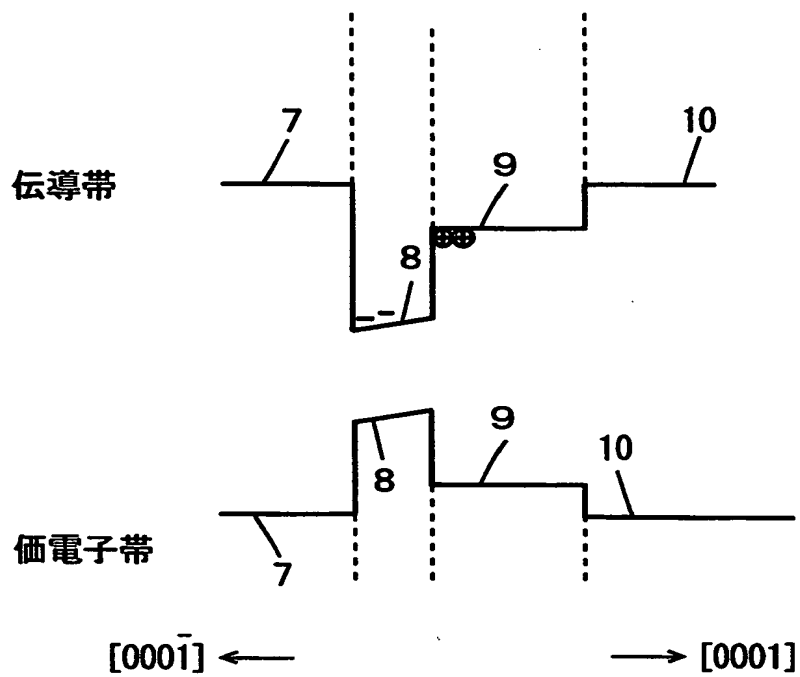
【図 1】



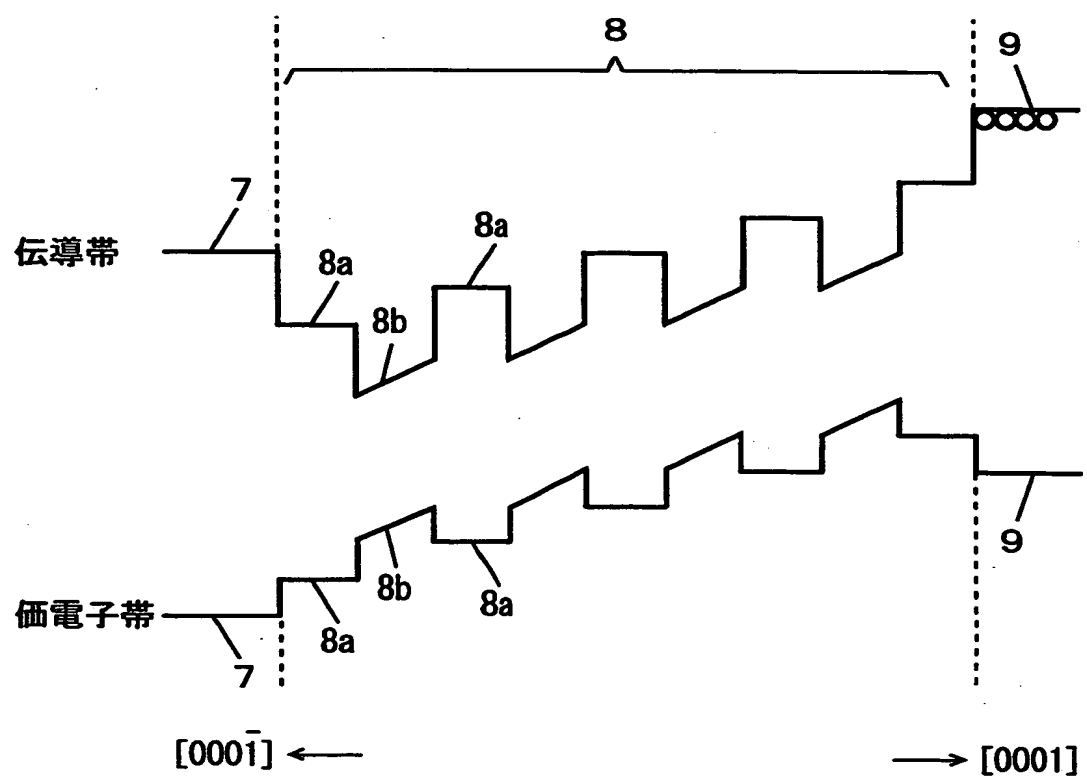
【図 2】



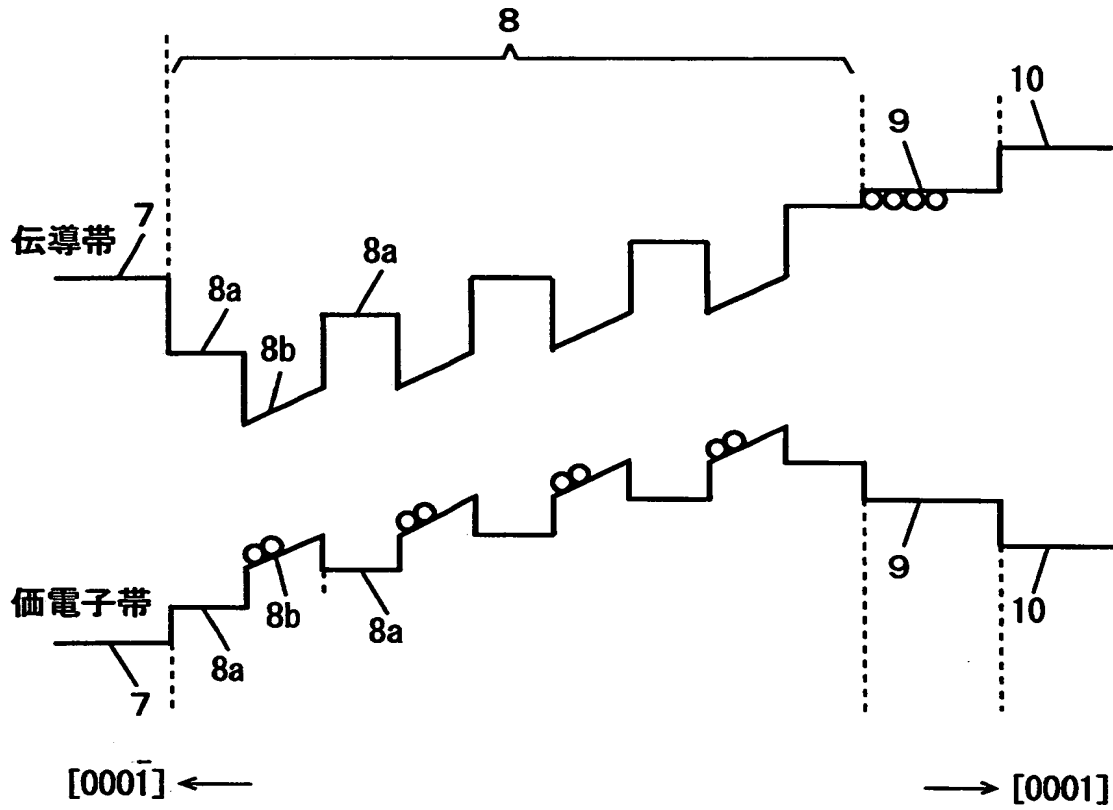
【図 3】



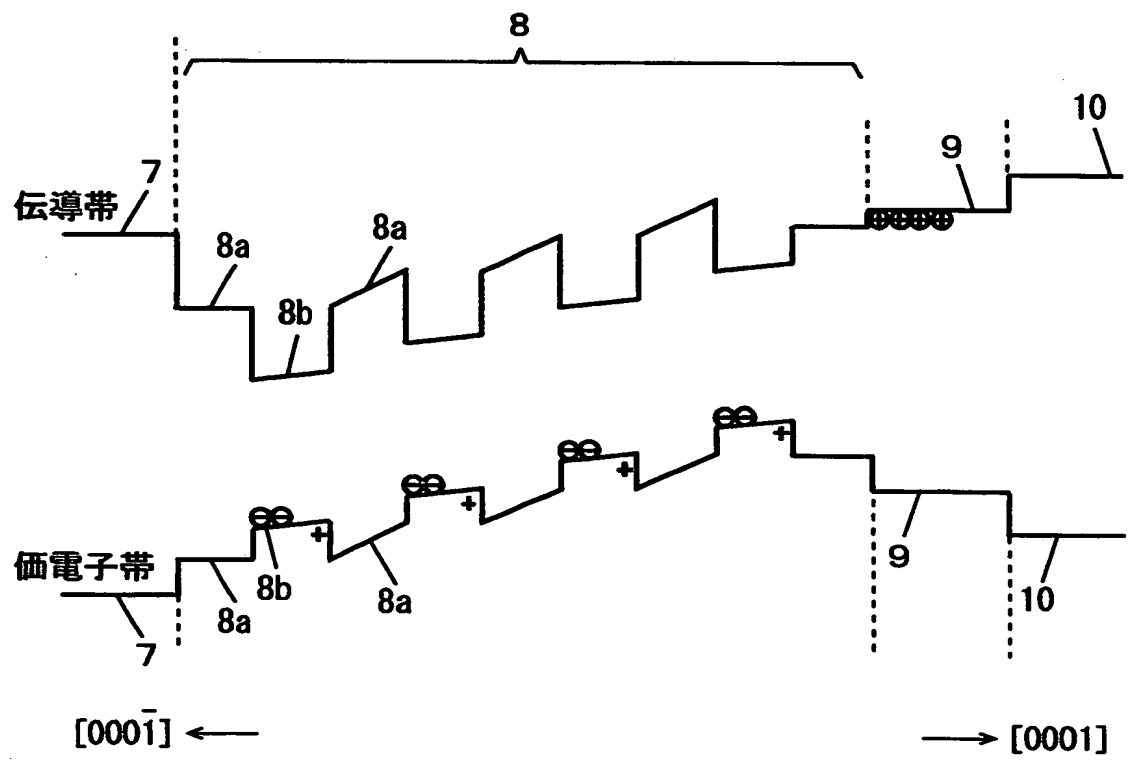
【図 4】



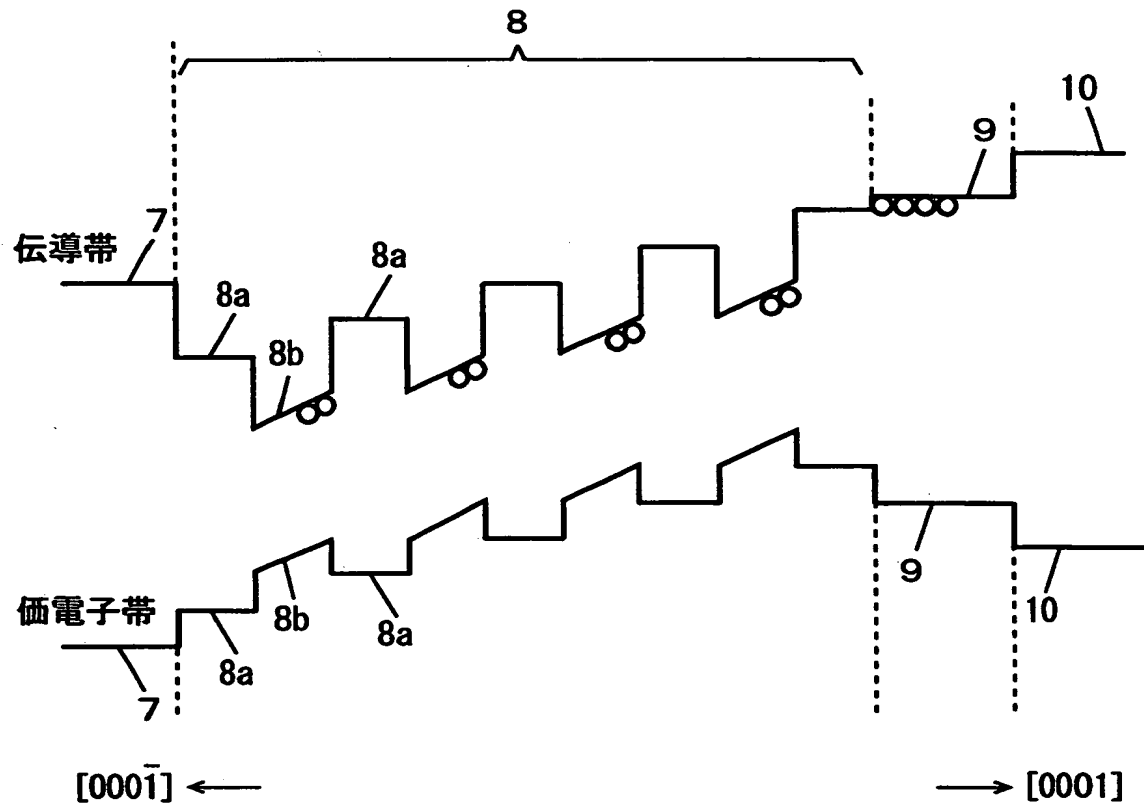
【図 5】



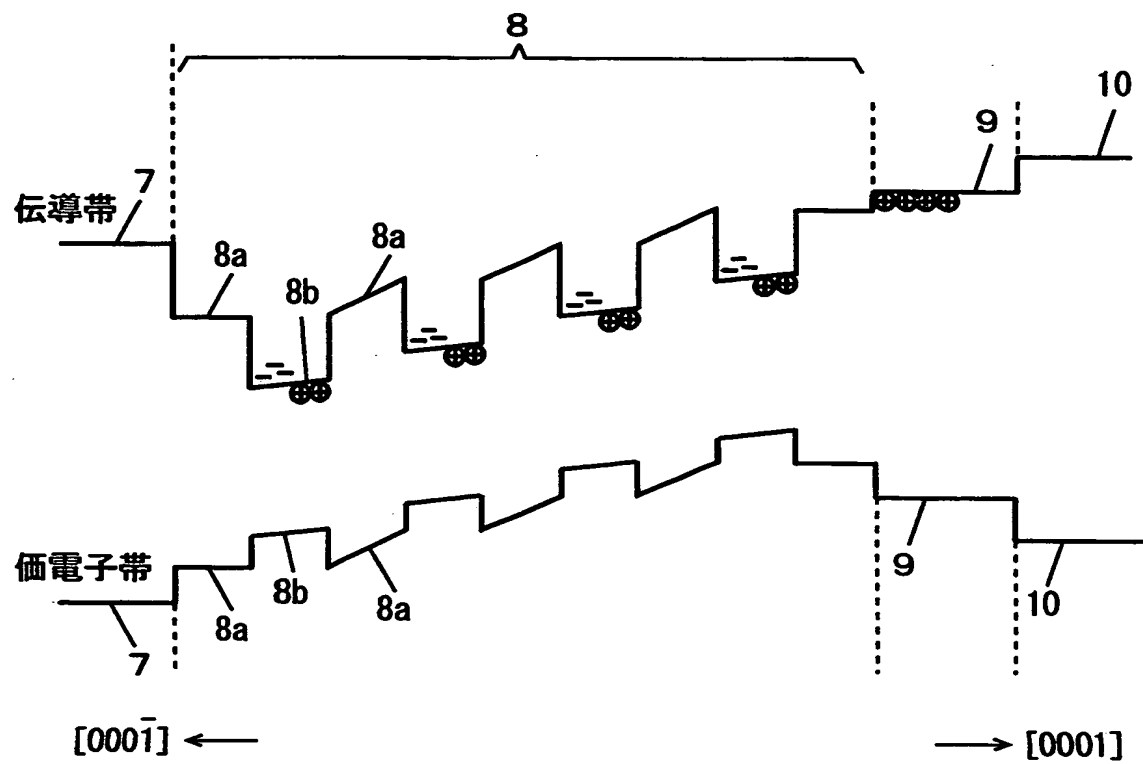
【図 6】



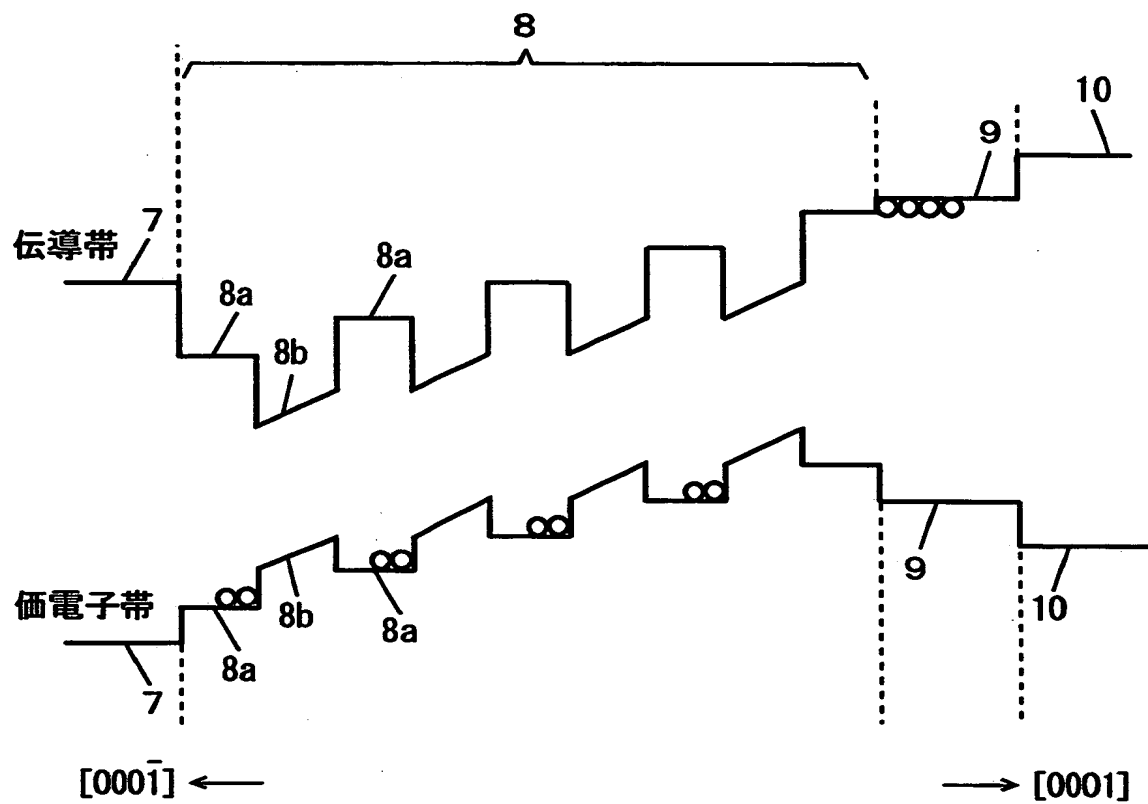
【図 7】



【図 8】



【図 9】



よび p 型の逆導電型層の構成はこれに限定されるものではない。n 型の逆導電型層および p 型の逆導電型層は、発光層 8 に比べて大きな禁制帯幅を有する InGa_N、AlGaInN、AlGa_N 等から構成されてもよい。このような構成を有する n 型の逆導電型層および p 型の逆導電型層を形成する場合においても、n 型の逆導電型層および p 型の逆導電型層の厚さは 1 ~ 100 nm 程度であり、アクセプタ準位あるいはドナー準位の濃度は $1 \times 10^{17} \sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度であることが好ましい。

【0156】

例えば、第 1 ~ 第 10 の実施例において、n 型の逆導電型層として、発光層 8 より禁制帯幅が大きくかつ p-AlGa_N からなる p-クラッド層 10 と禁制帯幅が同じかまたは p-クラッド層 10 に比べて禁制帯幅が大きな n-InGa_N 層、n-AlGaInN 層または n-AlGa_N 層を形成してもよい。

【0157】

あるいは、n 型の逆導電型層として、発光層 8 より禁制帯幅が大きくかつ p-AlGa_N からなる p-クラッド層 10 に比べて禁制帯幅が小さな n-InGa_N 層、n-AlGaInN 層または n-AlGa_N 層を形成してもよい。この場合、n 型の逆導電型層の屈折率が p-クラッド層 10 の屈折率に比べて大きくなるので、n 型の逆導電型層は光ガイド層としての機能も備える。

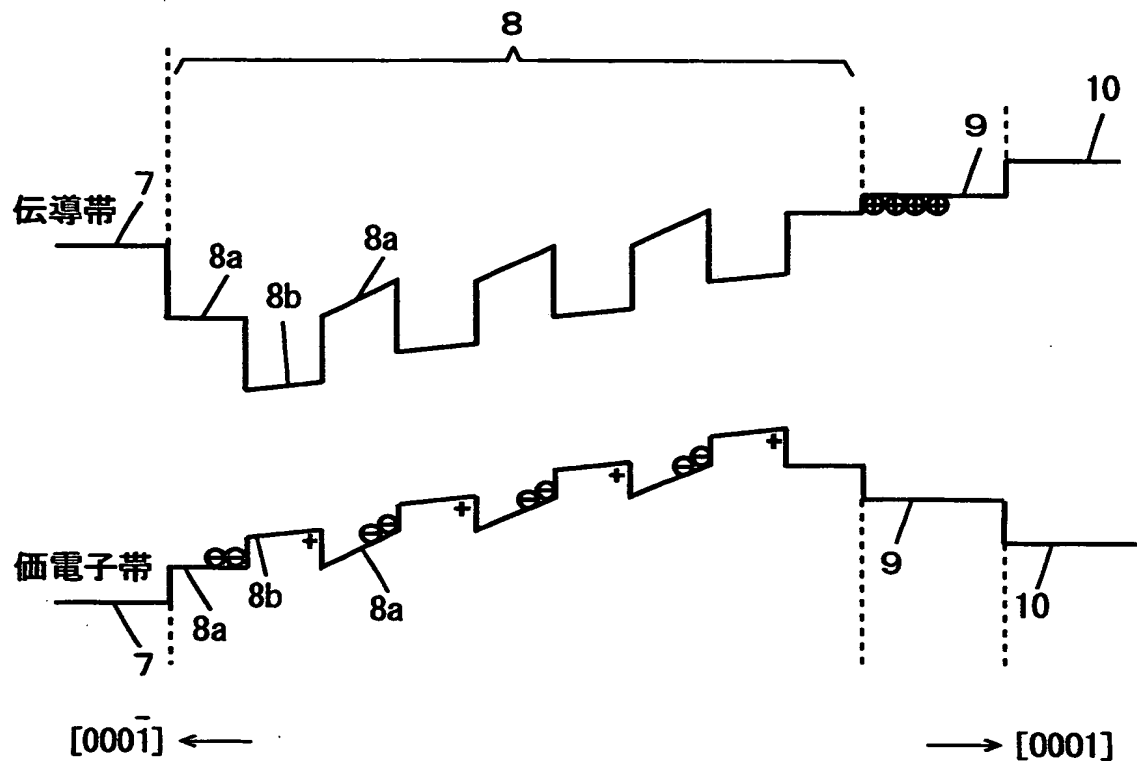
【0158】

一方、第 11 の実施例において、p 型の逆導電型層として、発光層 8 より禁制帯幅が大きくかつ n-AlGa_N からなる n-クラッド層 6 と禁制帯幅が同じかまたは n-クラッド層 6 に比べて禁制帯幅が大きな p-InGa_N 層、p-AlGaInN 層または p-AlGa_N 層を形成してもよい。

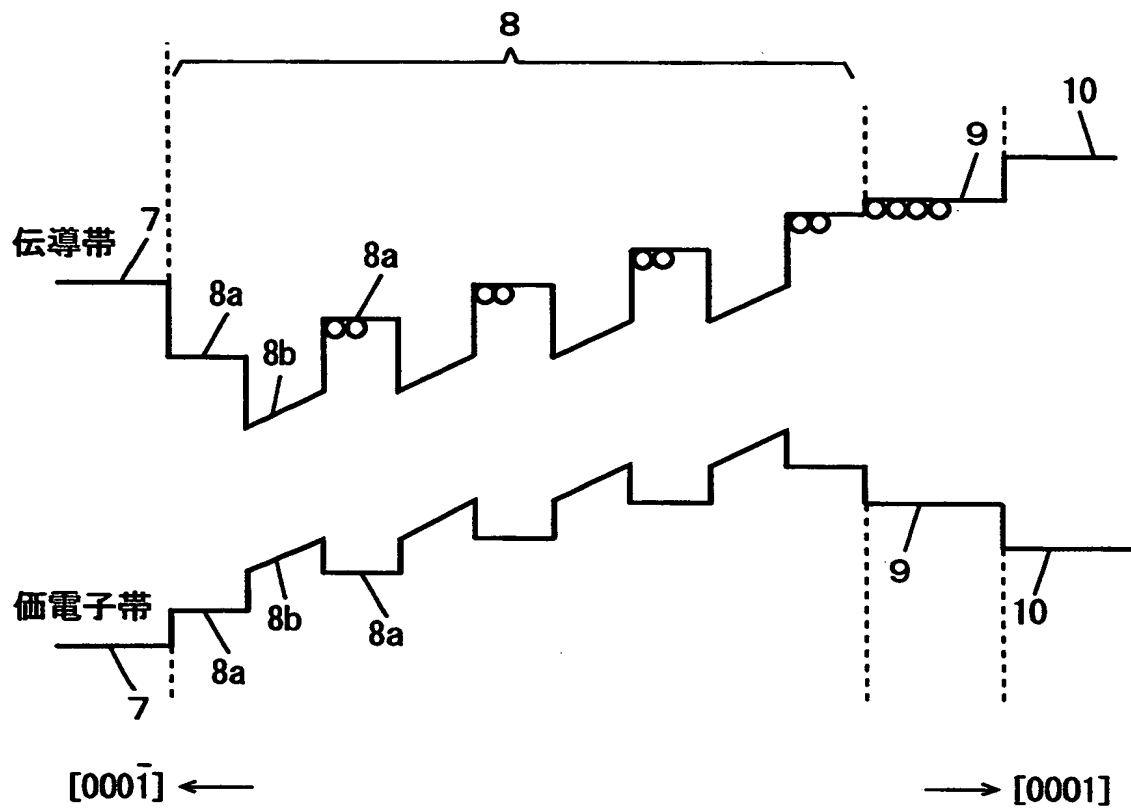
【0159】

あるいは、p 型の逆導電型層として、発光層 8 より禁制帯幅が大きくかつ n-AlGa_N からなる n-クラッド層 6 に比べて禁制帯幅が小さな p-InGa_N 層、p-AlGaInN 層または p-AlGa_N 層を形成してもよい。この場合、p 型の逆導電型層の屈折率が n-クラッド層 6 の屈折率に比べて大きくなるので、p 型の逆導電型層は光ガイド層としての機能を備える。

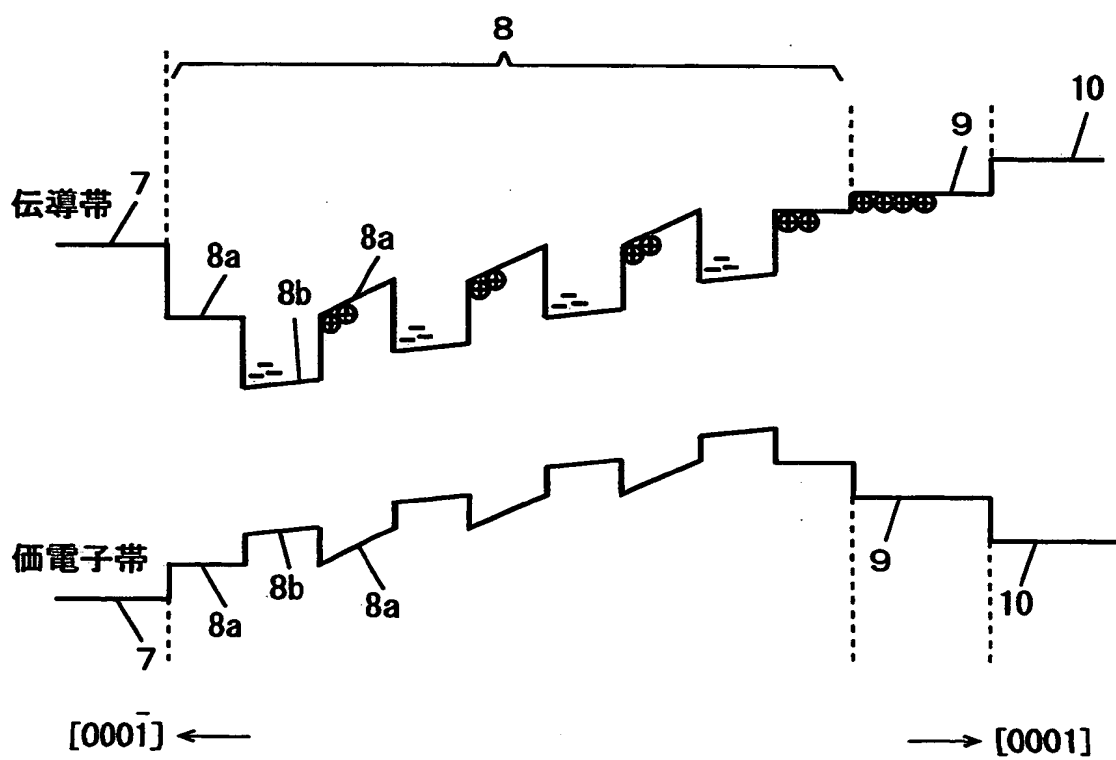
【図 1 0】



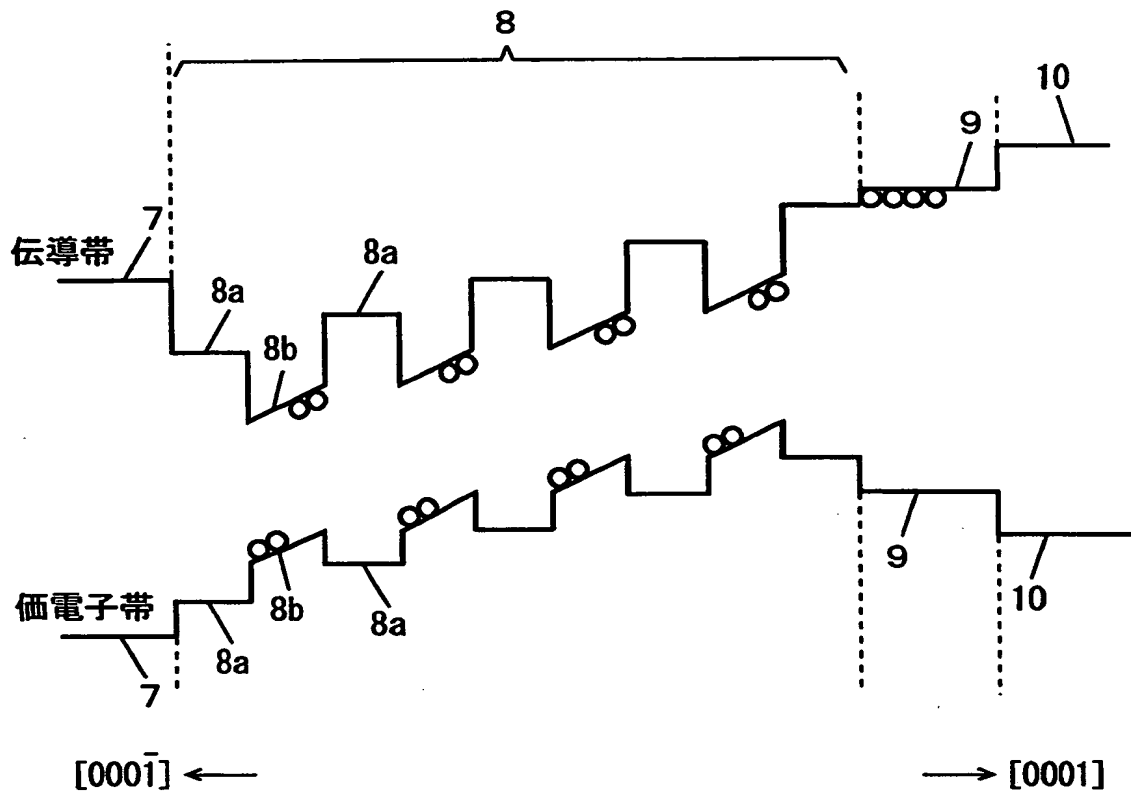
【図 1 1】



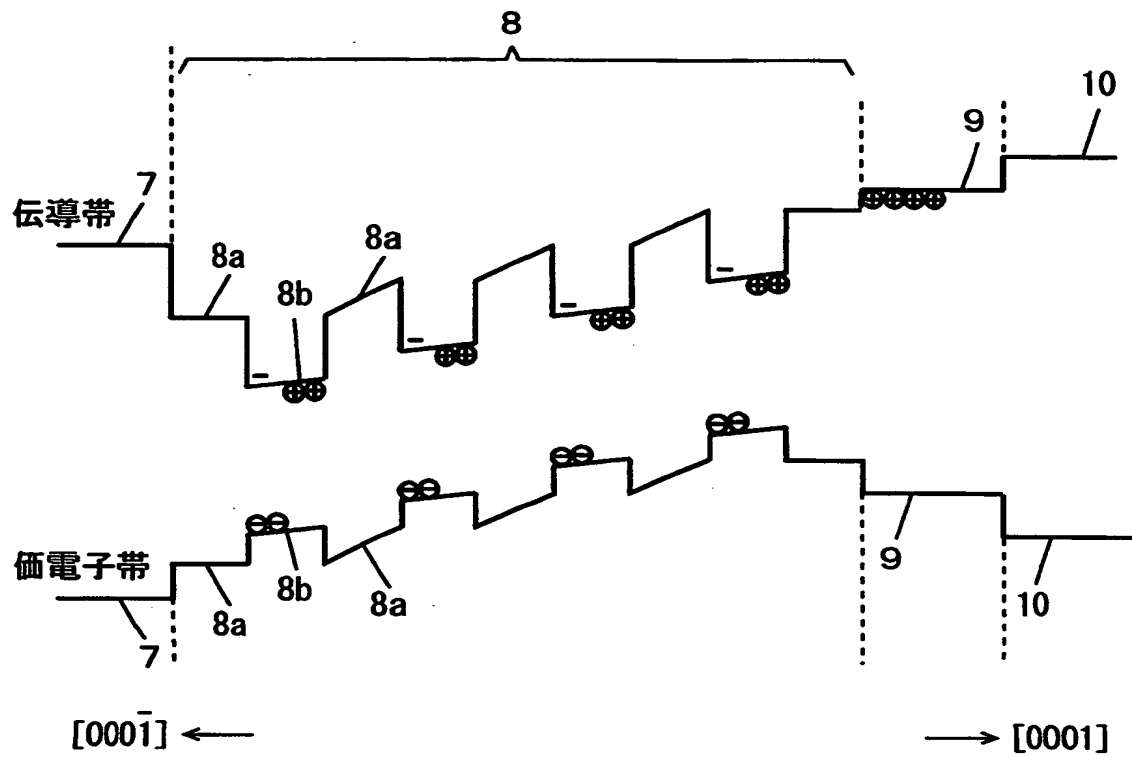
【図 1 2】



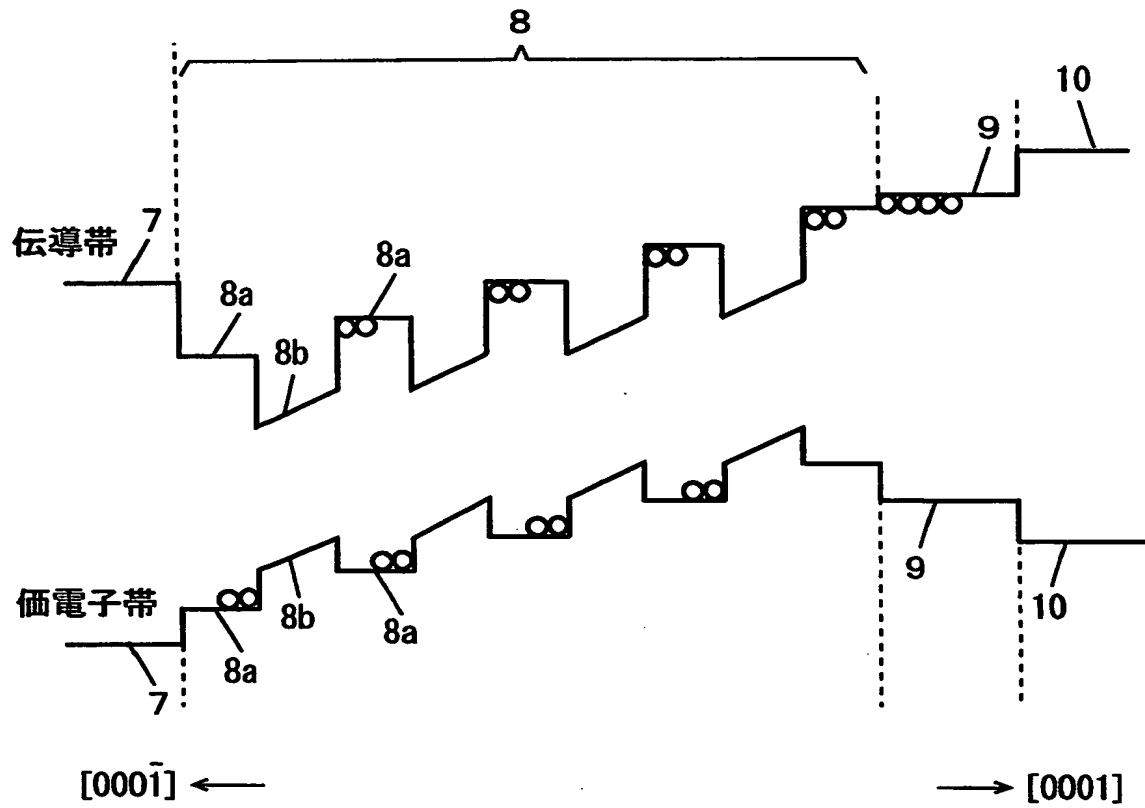
【図 1 3】



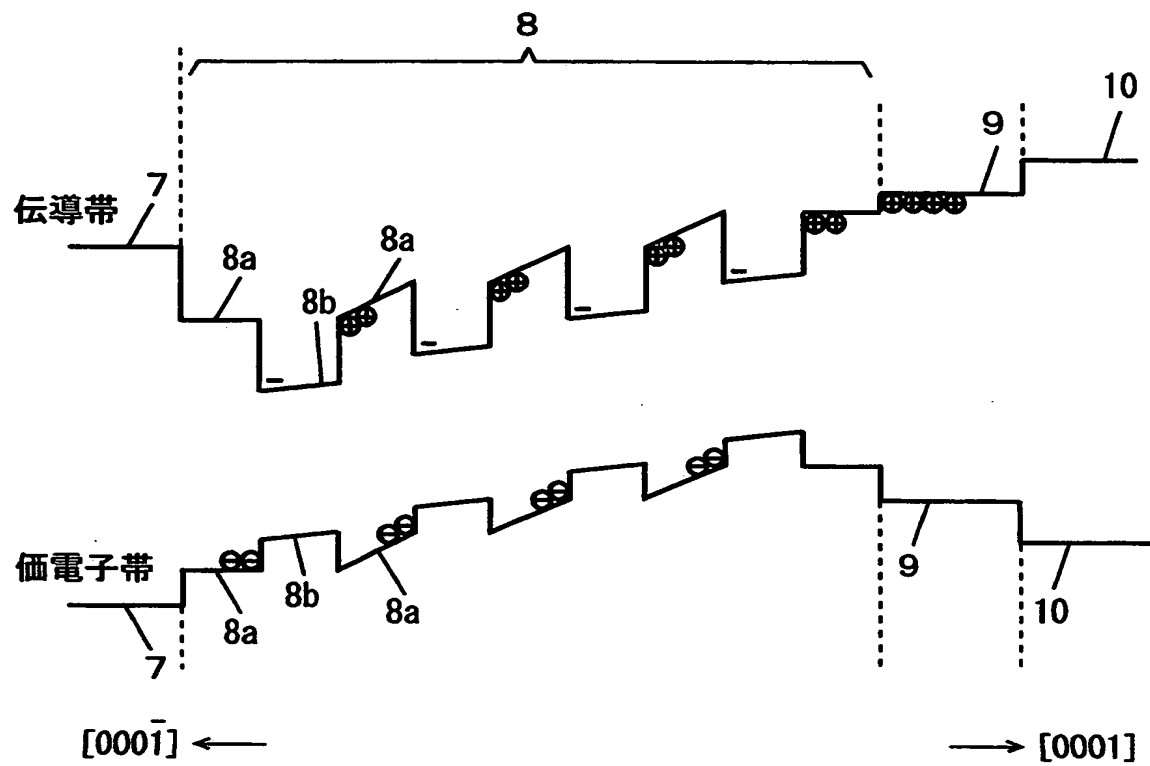
【図 1 4】



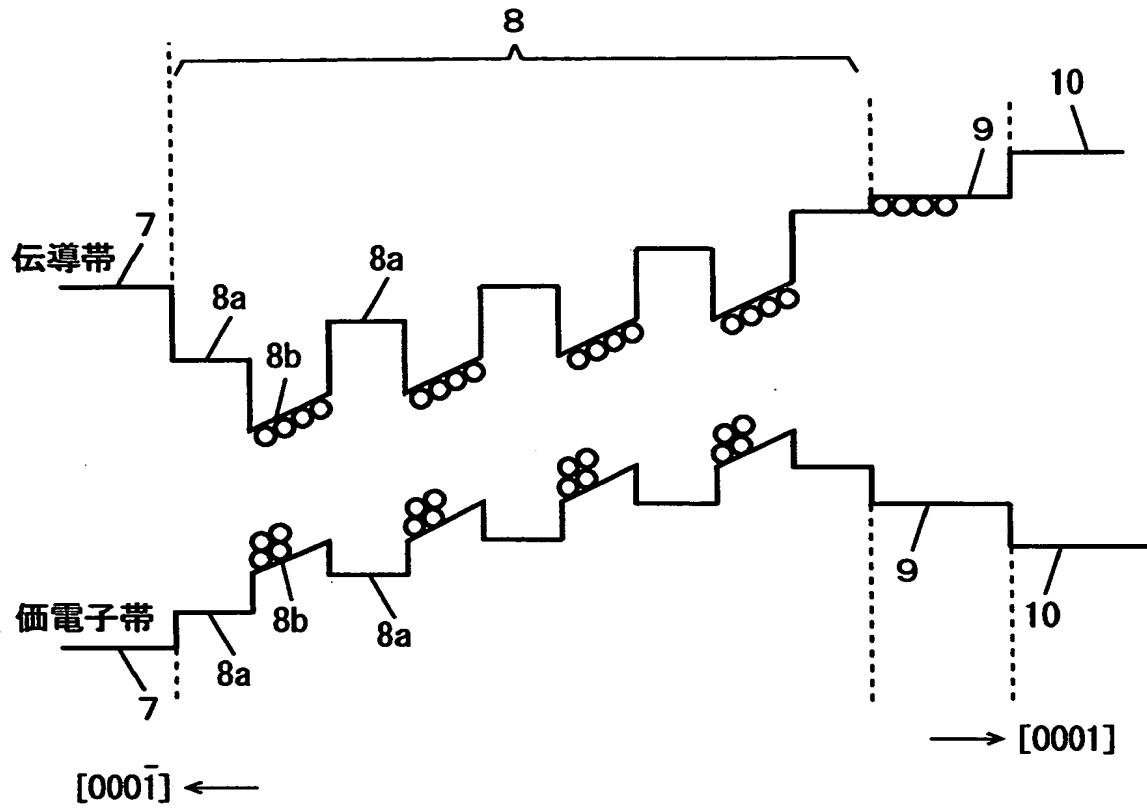
【図 1 5】



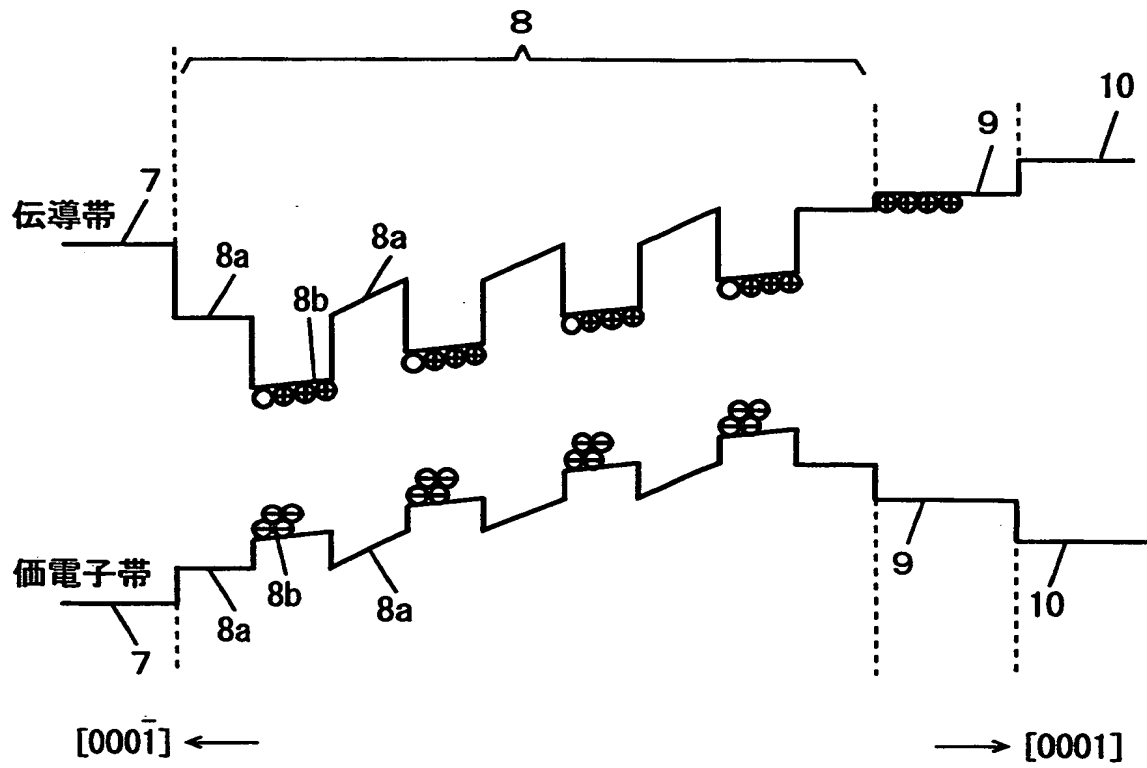
【図 1 6】



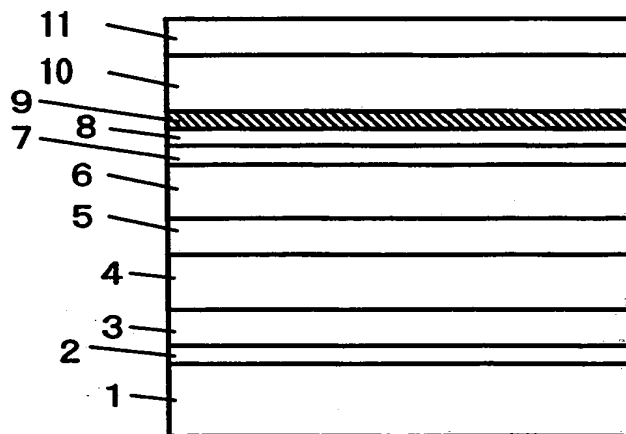
【図 1 7】



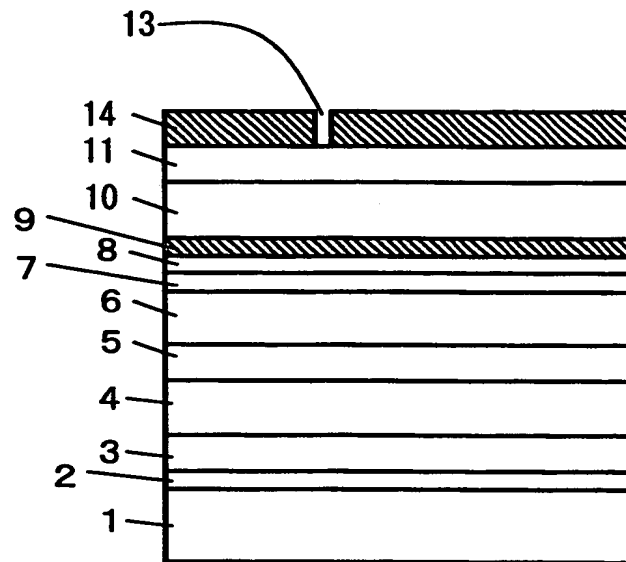
【図 1 8】



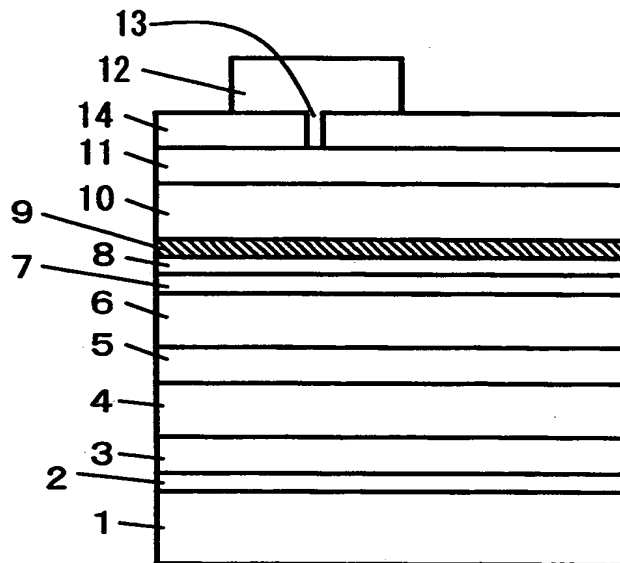
【図 1 9】



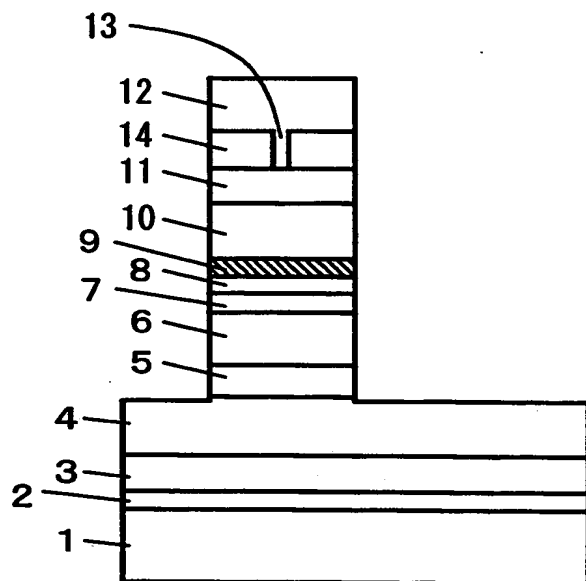
【図 2 0】



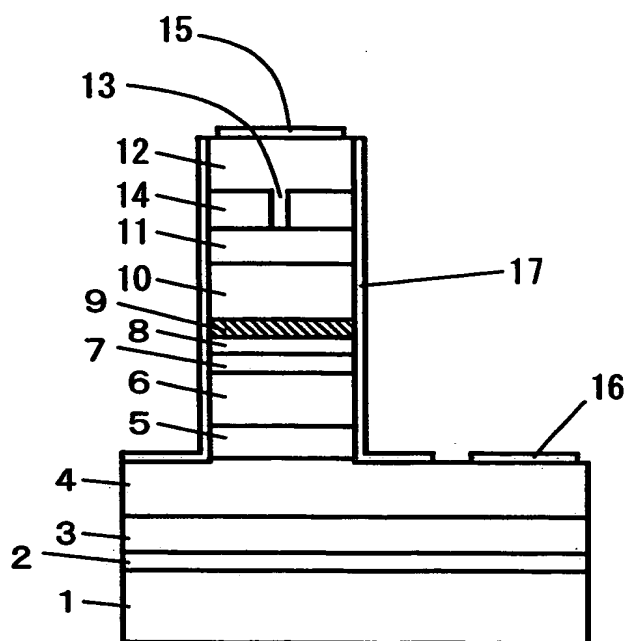
【図 2 1】



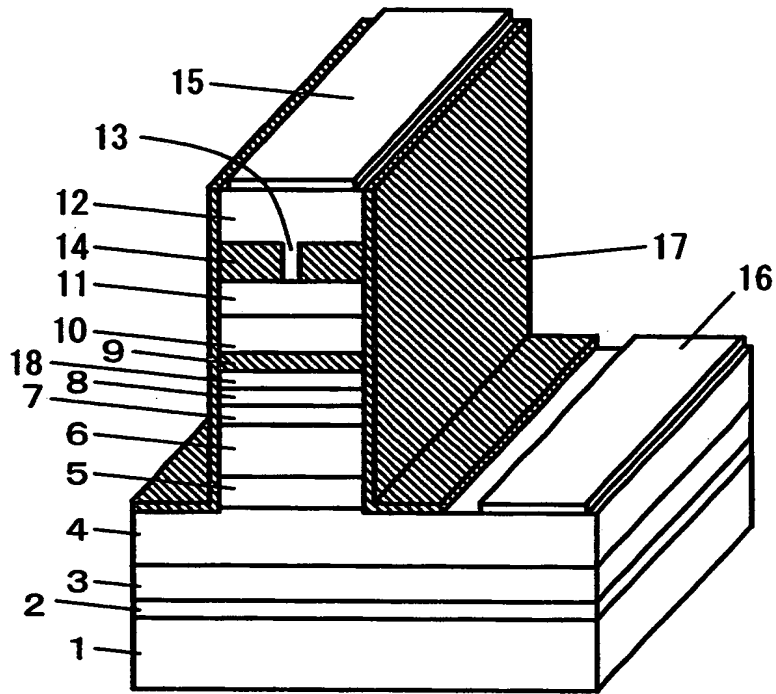
【図 2 2】



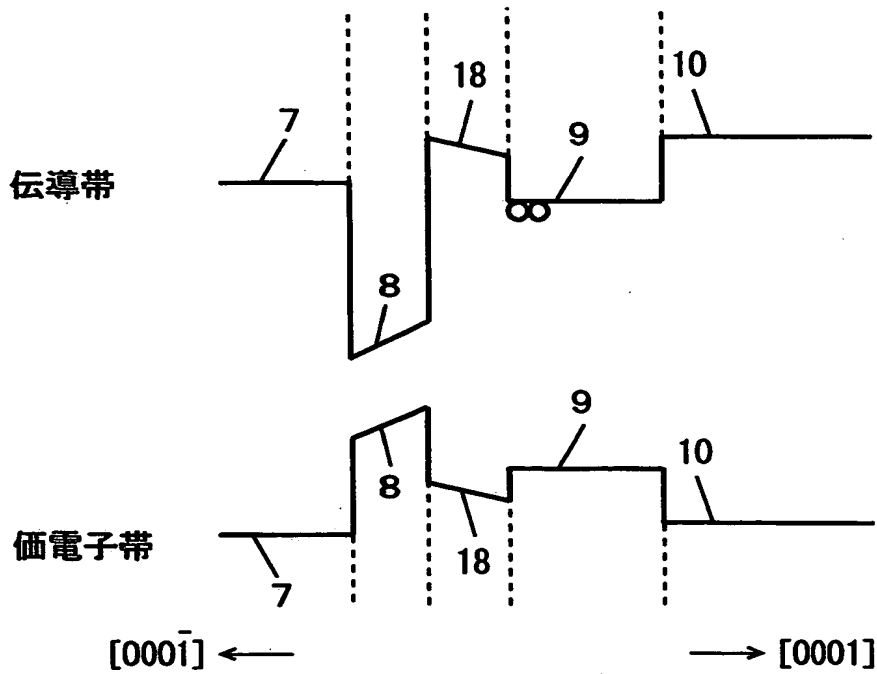
【図 2 3】



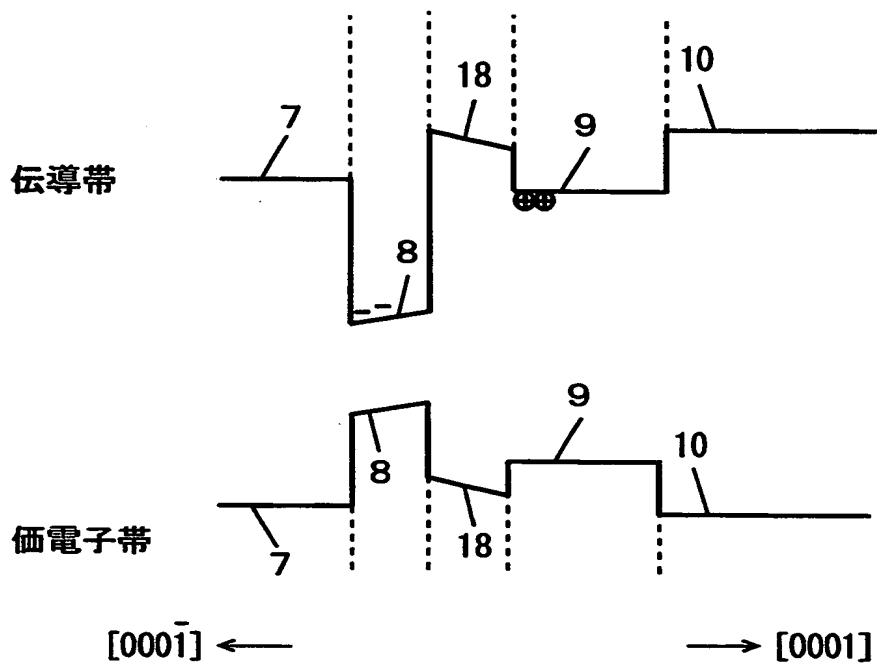
【図 2 4】



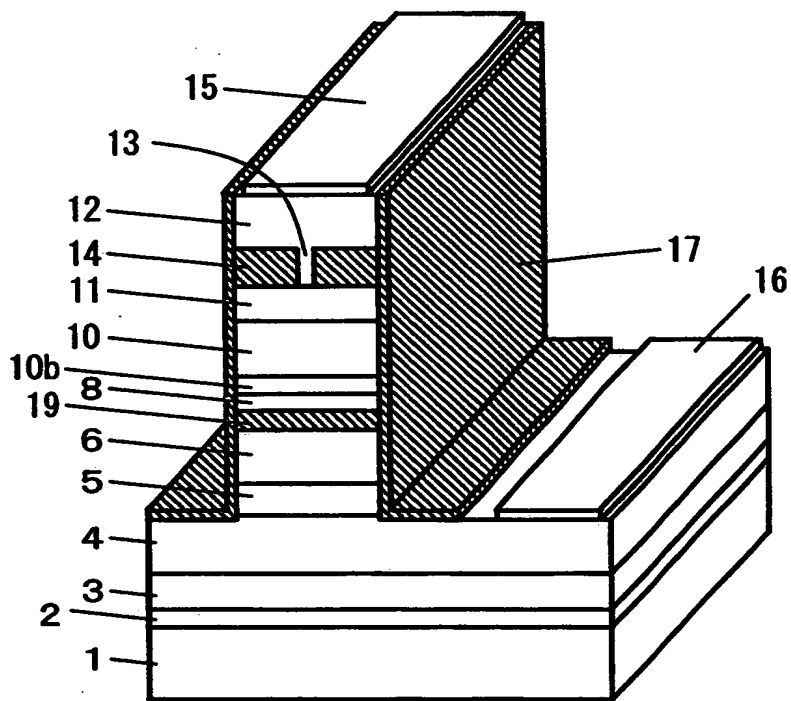
【図 2 5】



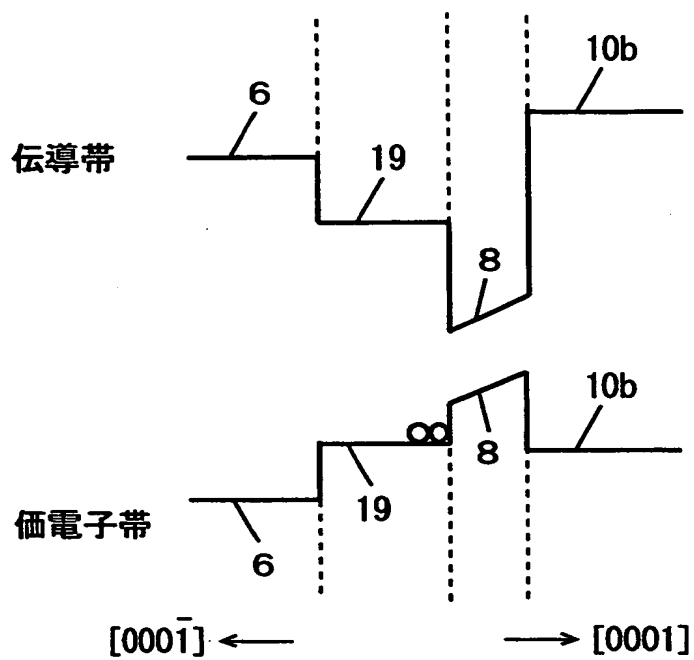
【図 2 6】



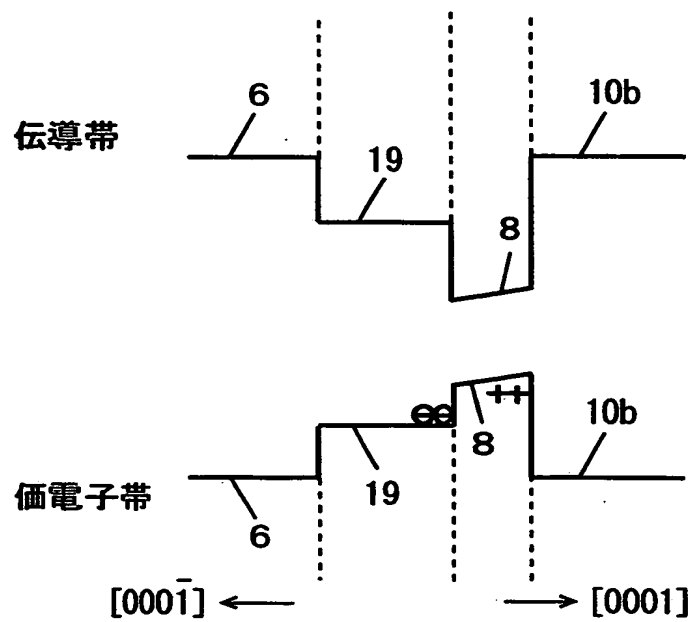
【図 2 7】



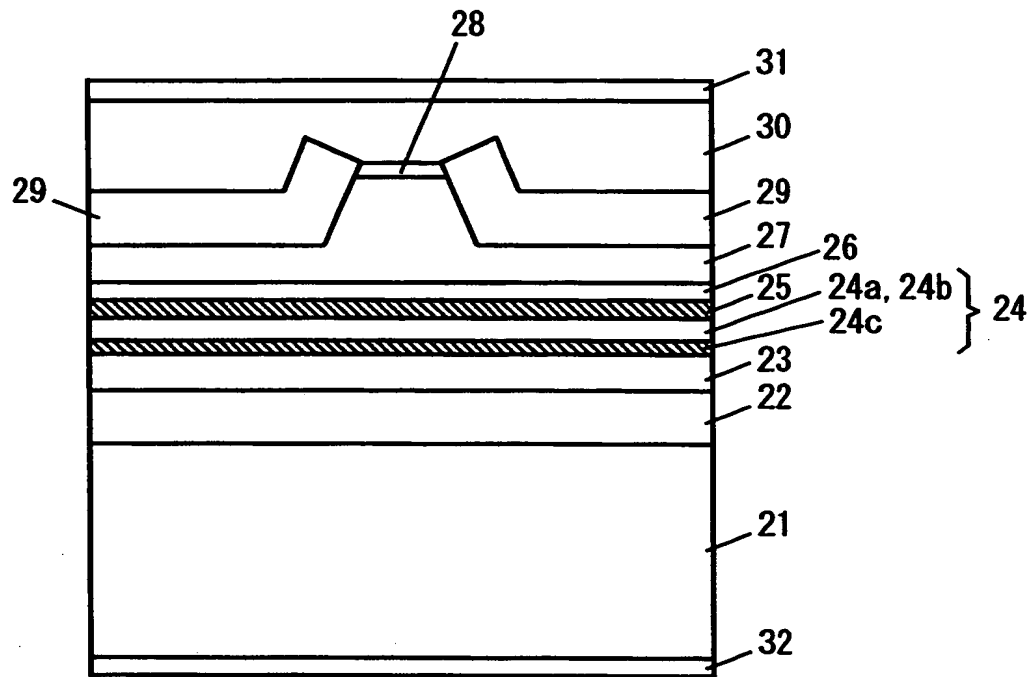
【図 2 8】



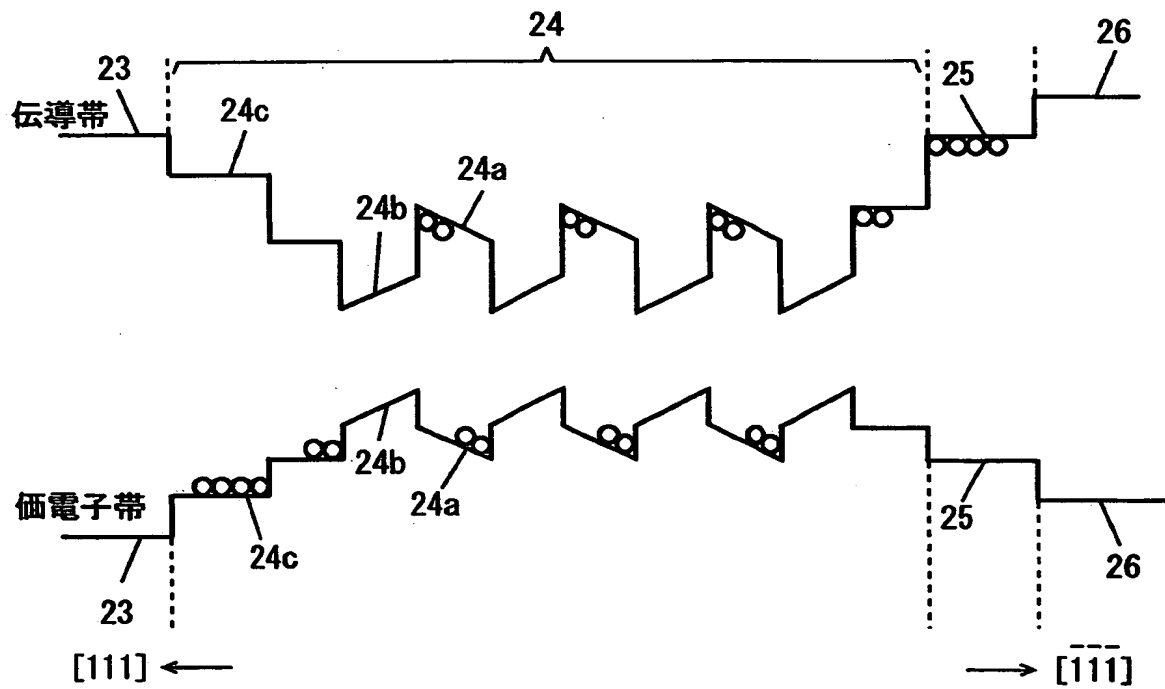
【図 2 9】



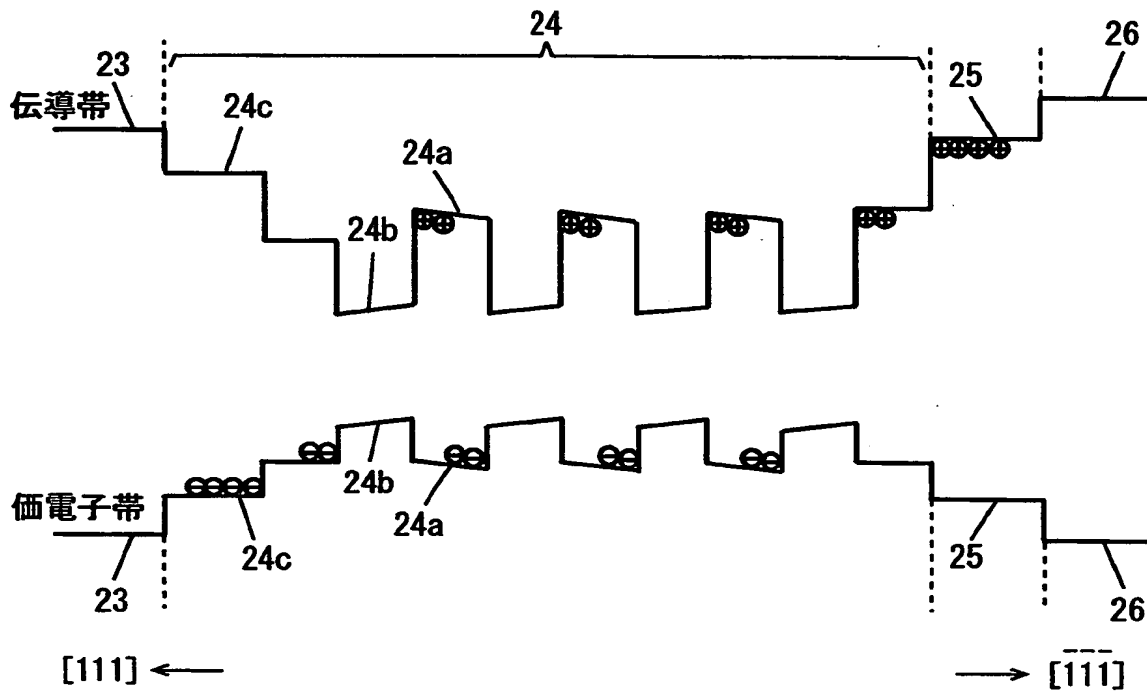
【図 3 0】



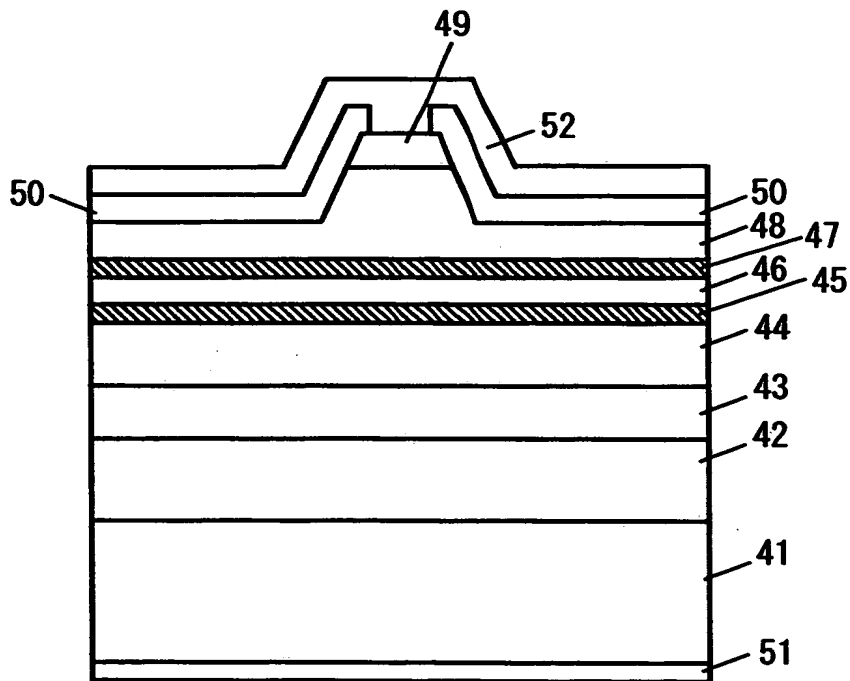
【図 3 1】



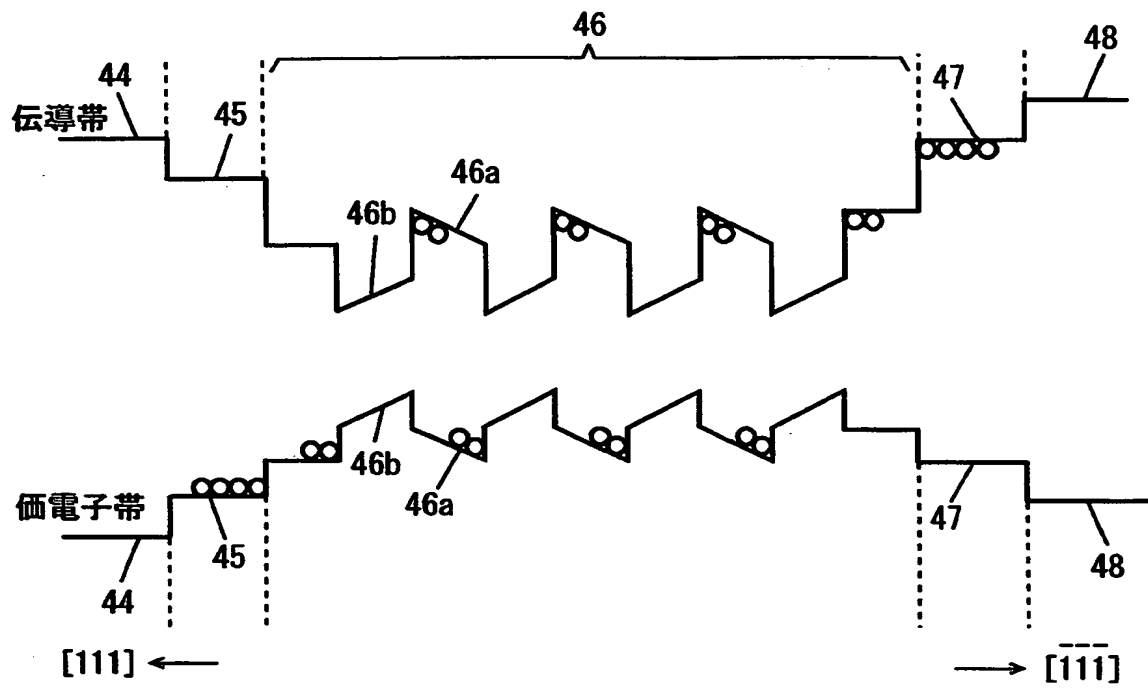
【図 3 2】



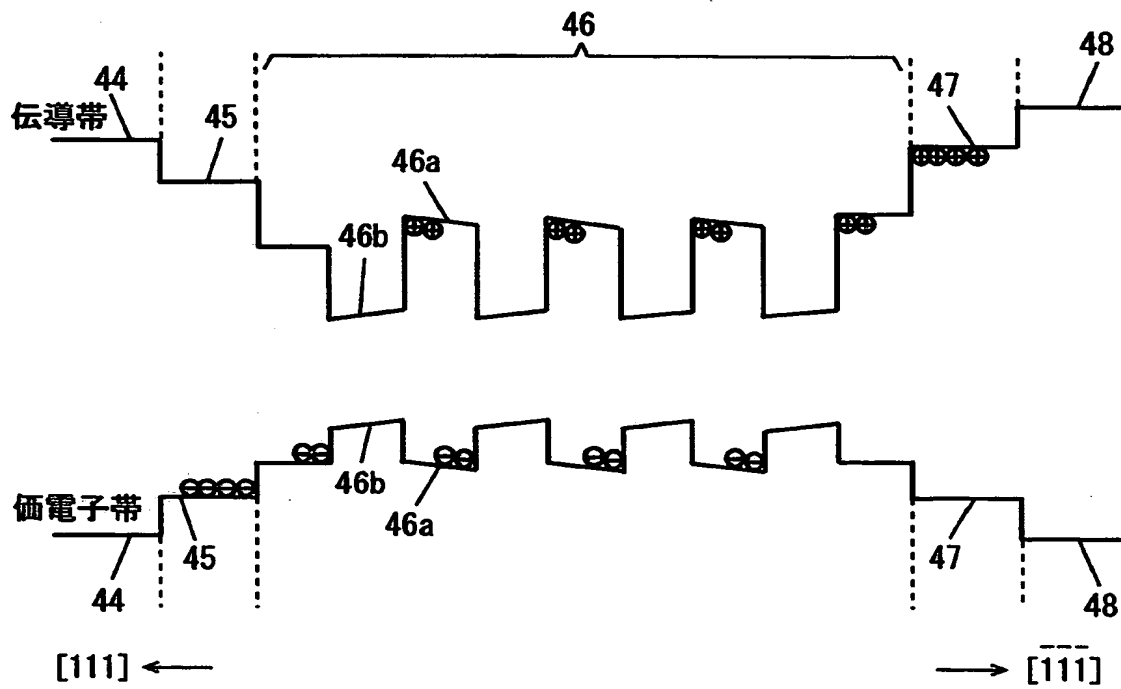
【図 3 3】



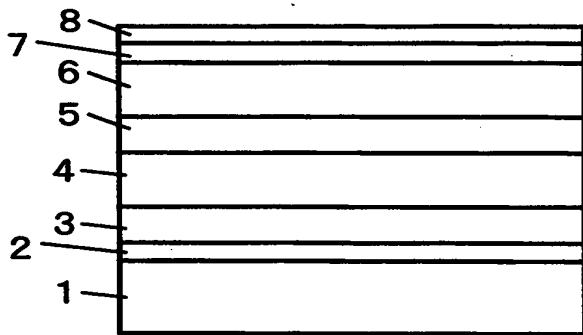
【図 3 4】



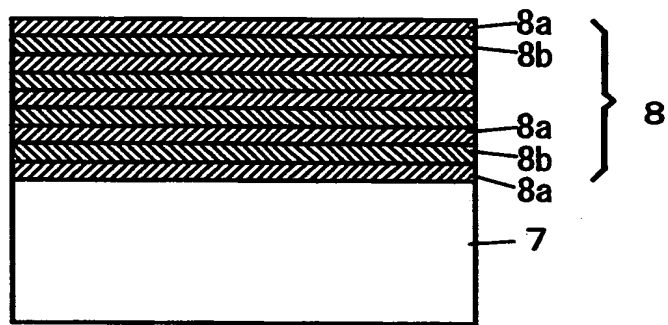
【図 3 5】



【図 3 6】

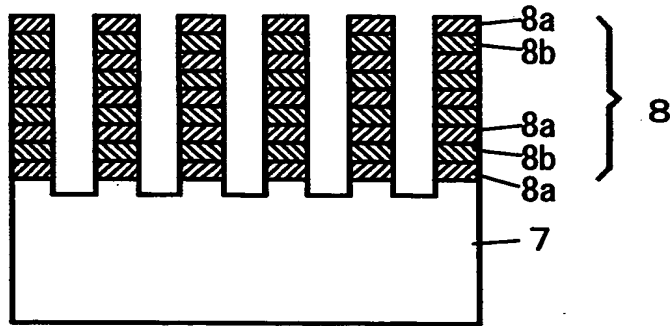


【図 3 7】

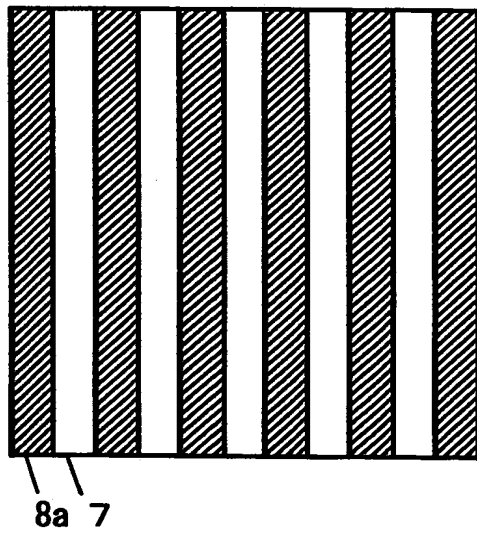


【図 3 8】

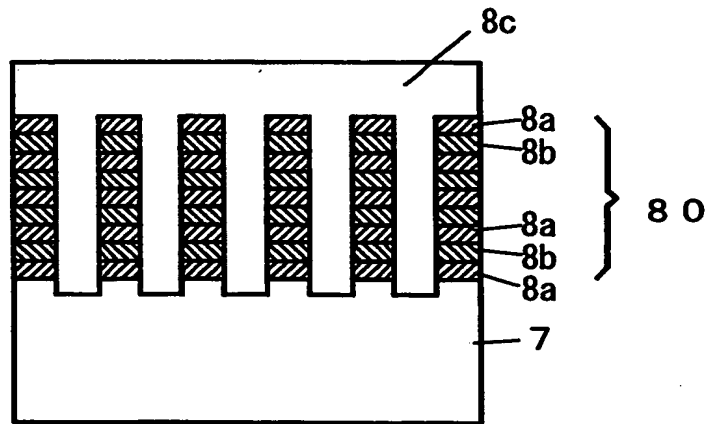
(a)



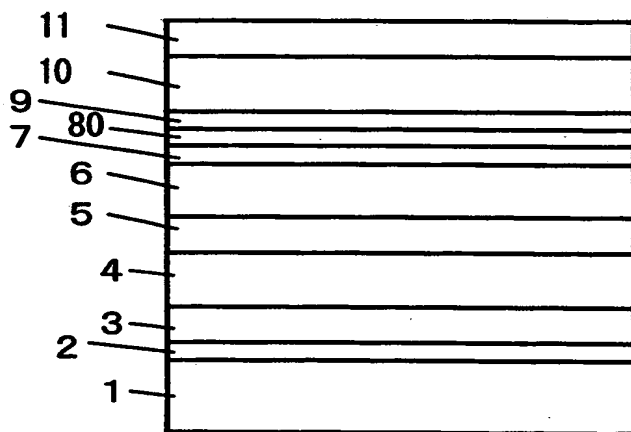
(b)



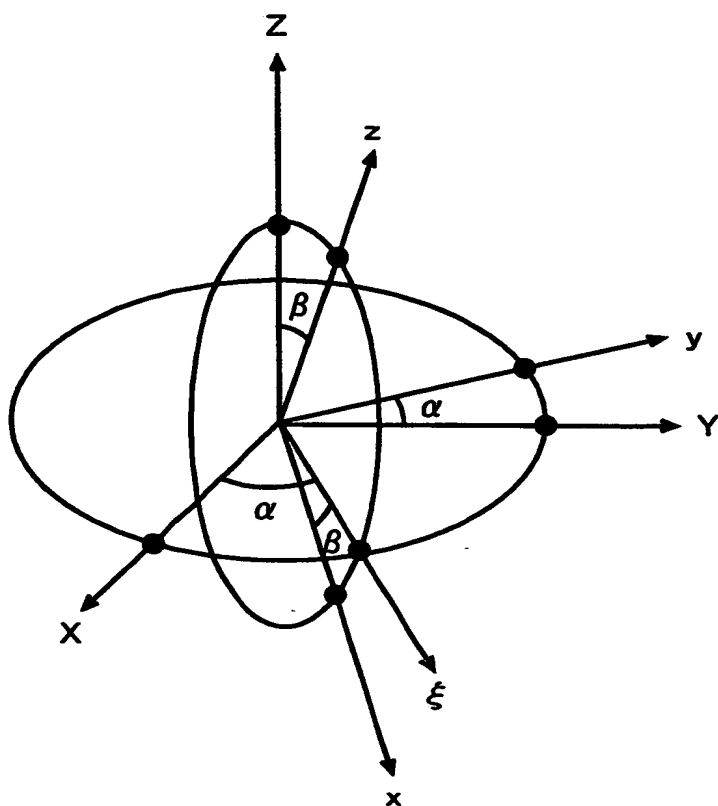
【図 3 9】



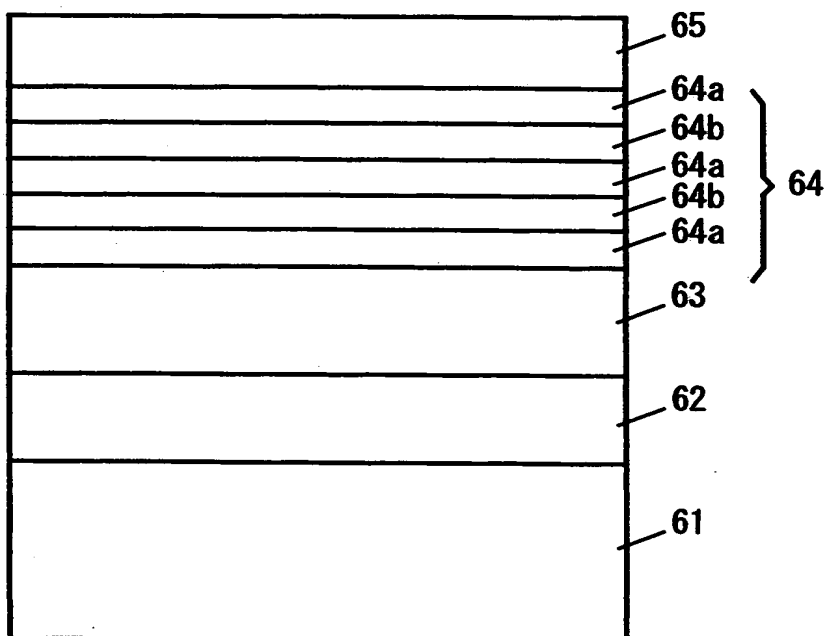
【図 4 0】



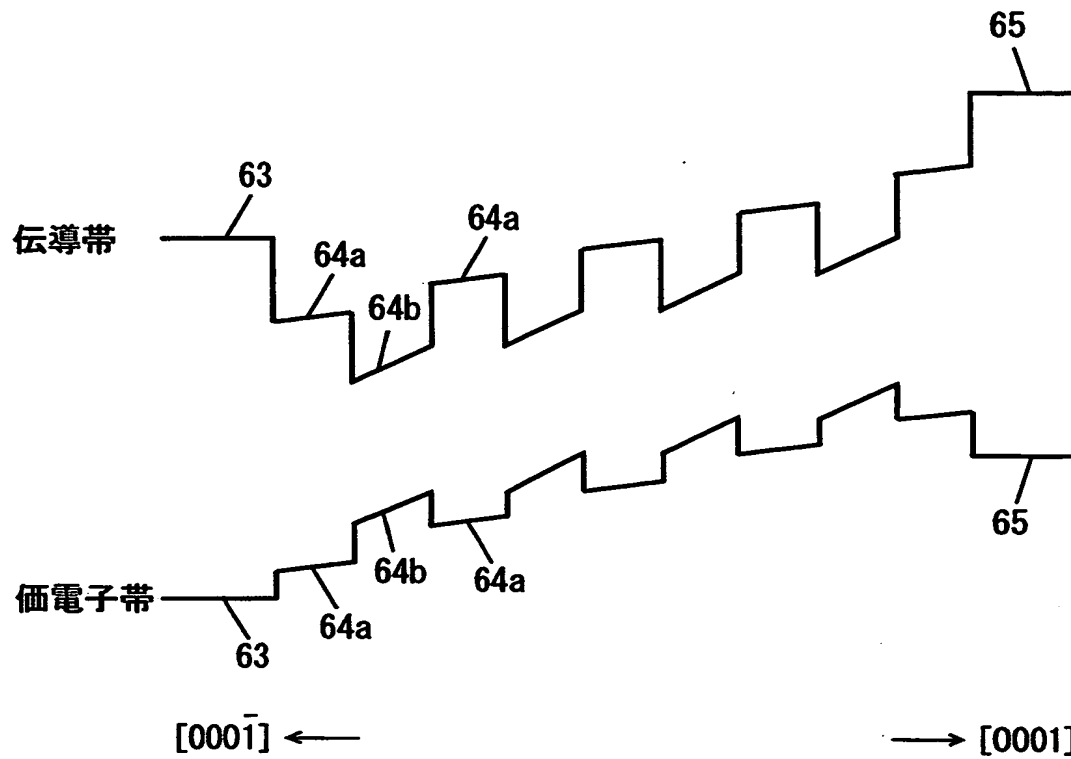
【図 4 1】



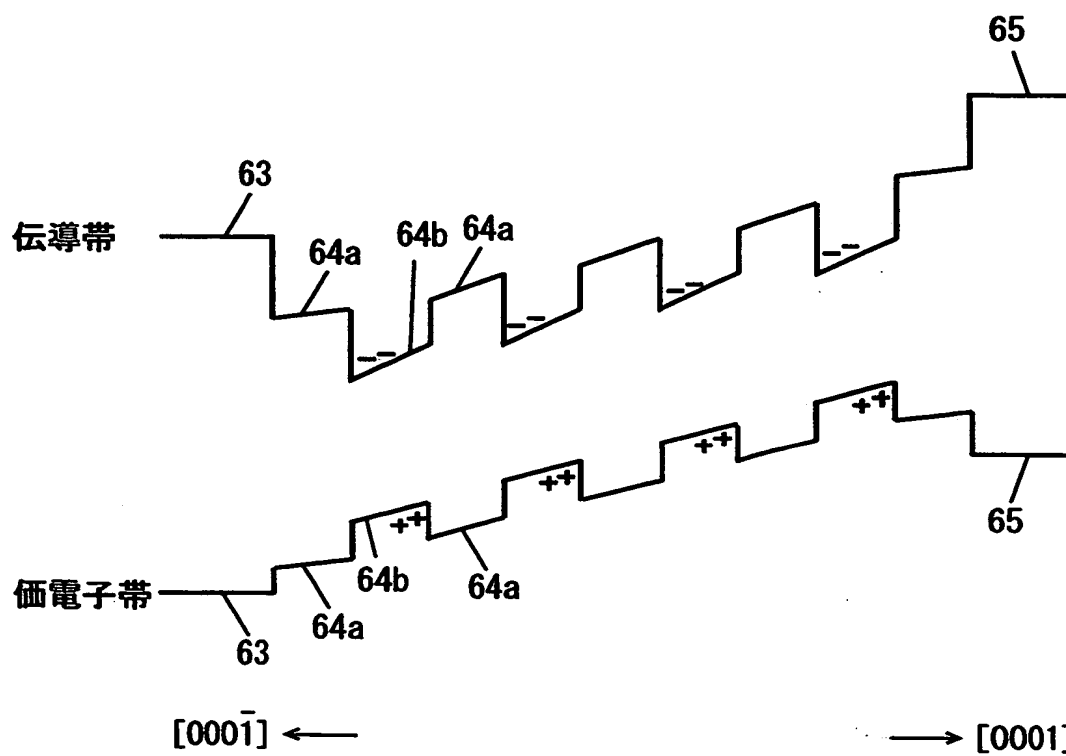
【図 4 2】



【図 4 3】



【図 4 4】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 発光効率が高く動作電流またはしきい値電流が低い発光素子を提供することである。

【解決手段】 発光層 8 と $p\text{-AlGaIn}$ からなる p -クラッド層 10 との間に、 $n\text{-GaIn}$ からなる n -逆導電層 9 が形成されている。 n -逆導電層 9 の禁制帯幅は、発光層 8 の禁制帯幅に比べて大きくかつ p -クラッド層 10 の禁制帯幅に比べて小さい。

【選択図】 図 3

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000001889]

1. 変更年月日 1993年10月20日

[変更理由] 住所変更

住 所 大阪府守口市京阪本通2丁目5番5号
氏 名 三洋電機株式会社

